

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# **Láser multi-longitud de onda de fibra dopada con erbio con realimentación en anillo para medición remota de temperatura**



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

**Trabajo Fin de Grado**

Nombre y apellidos del autor: Noé San Fabián García

Nombre y apellidos del director/es: Silvia Díaz Lucas

Pamplona, 27 de junio de 2016

*Me gustaría agradecer a...*

*Silvia Díaz Lucas por la oportunidad y la ayuda ofrecida a lo largo de este trabajo fin de grado.*

*También me gustaría agradecer a Ioseba Monasterio y Rubén Fernández por el tiempo compartido en el laboratorio y a todas las personas del laboratorio de fotónica por su amabilidad en la ayuda prestada. Por último también me gustaría agradecer a mis padres por el apoyo ofrecido en estos tres meses de trabajo.*

## Resumen

Este trabajo fin de grado ha sido realizado por Noé San Fabián García, estudiante del grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación. Escogí este tema de trabajo por mi gran interés en los sistemas de comunicación ópticos dentro de la rama de Sistemas de telecomunicación.

Los objetivos de este trabajo fin de grado han sido estudiar la estabilidad en tiempo y potencia de láseres multi-longitud de onda de fibra y su implementación como sensor de temperatura remoto. Para la realización de este trabajo se realizó un montaje al que se aplicaron distintas configuraciones de componentes.

Para lograr dichos objetivos se necesitaron una gran cantidad de datos y mediciones que tras ser analizados se emplearon para respaldar las conclusiones de este trabajo.

## Palabras clave

- ASE: Emisión de amplificación espontánea.
- EDF: Fibra dopada con erbio.
- EDFA: Amplificador de fibra dopada con erbio.
- EDFL: Láser de fibra dopada con erbio.
- FASE: Emisión de amplificación espontánea hacia adelante.
- FBG: Red de difracción de Bragg.
- FWM: Mezclado de cuatro ondas.
- MEDFRL: láser multi-longitud de onda de fibra dopada con erbio en anillo.
- OSA: Analizador de espectros ópticos.
- OSNR: Relación señal-ruido óptica.
- SMF: Fibra óptica monomodo estándar.
- TFG: Trabajo fin de grado.
- VOA: Atenuador óptico variable.
- WDM: Multiplexación por longitud de onda.



## Índice

1.	Introducción motivación y objetivos .....	6
2.	Fundamentos teóricos .....	7
2.1.	Introducción .....	7
2.2.	Fibra óptica.....	7
2.2.1.	Fundamentos.....	7
2.2.2.	Fibra óptica multimodo .....	8
2.2.3.	Fibra óptica monomodo.....	9
2.2.4.	Efectos lineales: atenuación y dispersión .....	9
2.2.5.	Efectos no lineales.....	13
2.3.	Fundamentos de la emisión óptica .....	16
2.3.1.	Absorción.....	16
2.3.2.	Emisión espontánea .....	17
2.3.3.	Emisión estimulada .....	17
2.4.	Amplificación óptica.....	18
2.4.1.	Conceptos básicos .....	18
2.4.2.	Amplificadores basados en efectos no lineales .....	19
2.4.3.	Amplificadores basados en emisión estimulada .....	20
2.5.	Láser de fibra óptica.....	23
2.5.1.	Láser de fibra óptica dopada con Erblio y configuración en anillo .....	24
2.6.	Dispositivos ópticos pasivos.....	29
2.6.1.	Multiplexor en longitud de onda.....	29
2.6.2.	Acoplador óptico .....	30
2.6.3.	Circulador .....	31
2.6.4.	Aislador óptico .....	31
2.6.5.	Atenuador óptico .....	32
2.7.	Sensor de fibra óptica .....	33
2.7.1.	Redes de difracción Bragg .....	34
2.7.2.	FBG como sensor.....	36

3. Láser multi-longitud de onda de fibra dopada con erbio con realimentación en anillo para medición remota de temperatura. ....	37
3.1. Introducción .....	37
3.2. Desarrollo experimental del circuito básico.....	37
3.2.1. Esquema inicial.....	37
3.2.2. Anillo de estabilidad .....	41
3.2.3. Otras configuraciones del splitter de salida .....	53
3.2.4. Sensor de temperatura .....	59
3.3. Implementación del sistema remoto .....	65
3.3.1. Introducción .....	65
3.3.2. Desarrollo del sistema remoto .....	65
3.3.3. Sensor de temperatura remoto .....	75
4. Conclusiones.....	81
5. Bibliografía .....	83
6. Anexo.....	85

# 1. Introducción motivación y objetivos

Hoy en día los láseres son elementos fundamentales, uno de los motivos de su importancia son sus propiedades físicas: alta potencia de emisión, espectro de emisión estrecho y baja intensidad de ruido. Los láseres están presentes en numerosas aplicaciones como en medicina mediante el uso de técnicas poco invasivas, en la industria como sensor, en investigación presente en sistemas de espectroscopía de alta resolución, en sistemas de telecomunicación etc...

Su creciente uso en muy diversos campos es una de las razones por las que es objeto de estudio en numerosas investigaciones. Uno de los principales campos de estudio son los láseres multi-longitud de onda de fibra óptica, su aplicación en sistemas WDM de alta densidad es fundamental. Existen diversas configuraciones y dispositivos empleados en el diseño de este tipo de láseres, con el objetivo de lograr un láser que emita en la 3ª ventana (1550 nm) uno de los elementos más frecuentes es el uso de EDF como medio amplificador.

Otra de las aplicaciones que es objeto de estudio es la implementación de sensores mediante estructuras láser, su inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas y precisión permiten obtener sensores fiables y precisos. Un sensor de fibra óptica es capaz de medir una gran cantidad de magnitudes físicas (velocidad, humedad, campos magnéticos/eléctricos, presión...).

Este trabajo fin de grado nace del interés en el estudio del comportamiento de un láser multi-longitud de onda de fibra dopada con erbio y su aplicación como sensor de temperatura remoto. A lo largo de este trabajo se estudiarán diversos cambios en el diseño propuesto con el objetivo de optimizar el sistema. Para ello se empleará un anillo de estabilidad y se probarán distintas relaciones de splitters de salida. Una vez completada la optimización del láser se estudiará su comportamiento como sensor de temperatura remoto.

## Objetivos de este proyecto:

- Diseño de un láser multi-longitud de onda con realimentación en anillo.
- Estudio experimental de la estabilidad del láser diseñado.
- Estudio experimental del comportamiento del láser diseñado frente a distintas variaciones en su configuración.
- Estudio experimental del comportamiento del láser como sensor de temperatura.
- Diseño y estudio experimental del comportamiento del láser como sensor remoto.

## 2. Fundamentos teóricos

### 2.1. Introducción

Para poder comprender adecuadamente el trabajo realizado, es necesario explicar los conceptos teóricos sobre los que se basa y los dispositivos empleados para su realización. A continuación se tratarán los siguientes temas: los fundamentos de la transmisión por fibra óptica, la amplificación óptica, los dispositivos empleados, láseres de fibra y sensor óptico.

### 2.2. Fibra óptica

La fibra óptica es uno de los medios de transmisión fundamentales hoy en día gracias a su baja atenuación, gran ancho de banda y su inmunidad frente a interferencias electromagnéticas. Sus aplicaciones son muy variadas, desde enlaces de comunicaciones hasta redes de sensores pasando por su empleo como sistema de iluminación. En este trabajo nos centraremos más en sus propiedades como medio de transmisión de señales.

#### 2.2.1. Fundamentos

La reflexión total interna es el fenómeno por el cual se produce el guiado de luz a través de la fibra óptica. Siempre que el ángulo incidente sea mayor que el ángulo crítico y partiendo del medio con mayor índice de refracción hacia el menor, toda la luz se reflejará transmitiendo la señal a lo largo de la fibra óptica.

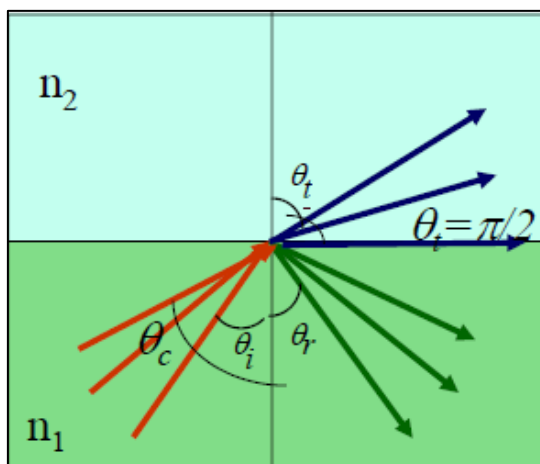
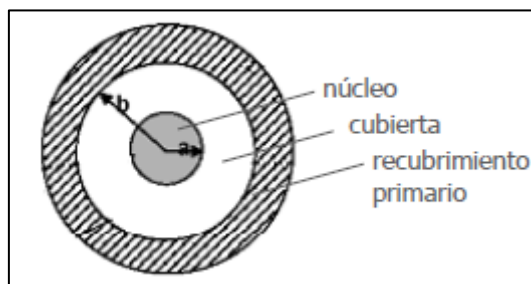


Figura 1: Reflexión total interna.

La fibra óptica es una guía de onda dieléctrica y cilíndrica, formada por un núcleo rodeado por la cubierta. El núcleo es la zona por la que se propaga la luz, mientras que la cubierta, cuyo índice de refracción es menor al del núcleo, mantiene la luz confinada.



**Figura 2: Corte transversal de una fibra óptica.**

Existen distintas clases de fibras ópticas, en función del material (plástico, sílice, ZBLAN...), si es monomodo o multimodo, en función del perfil de índice de refracción (salto de índice, índice gradual)... Las principales características las veremos brevemente a continuación.

### 2.2.2.Fibra óptica multimodo

La propagación de la luz a través de una guía de onda se puede describir en términos de una serie de ondas electromagnéticas guiadas conocidas como modos de guía de onda. Cada modo es un patrón del campo eléctrico y magnético que se repite a lo largo de la fibra a intervalos equivalentes a la longitud de onda ( $\lambda$ ). Solo algunos de estos modos son capaces de propagarse a través de la fibra [1].

Las fibras ópticas multimodo permiten la propagación de varios modos. Esto supone más pérdidas y más dispersión, dado que la luz viaja menos confinada que en una fibra monomodo. Estas son las principales razones por las que solo se emplea fibra óptica multimodo para distancias cortas (varios kilómetros) y bajos anchos de banda.

El diámetro del núcleo de las fibras multimodo mide entre 50  $\mu\text{m}$  y 62.5  $\mu\text{m}$ , notablemente más ancho que las fibras monomodo (entre 8  $\mu\text{m}$  y 12  $\mu\text{m}$ ). Esta mayor anchura permiten un mejor acoplo de potencia en la fibra, especialmente cuando el transmisor es una fuente con un espectro de emisión ancho, como es un LED.

Para suavizar una de sus principales desventajas, la alta dispersión, se crearon fibras multimodo de índice gradual. Los modos que recorren más distancia son más rápidos, de esta manera se reduce la dispersión notablemente permitiendo alcanzar mayores distancias y anchos de banda.

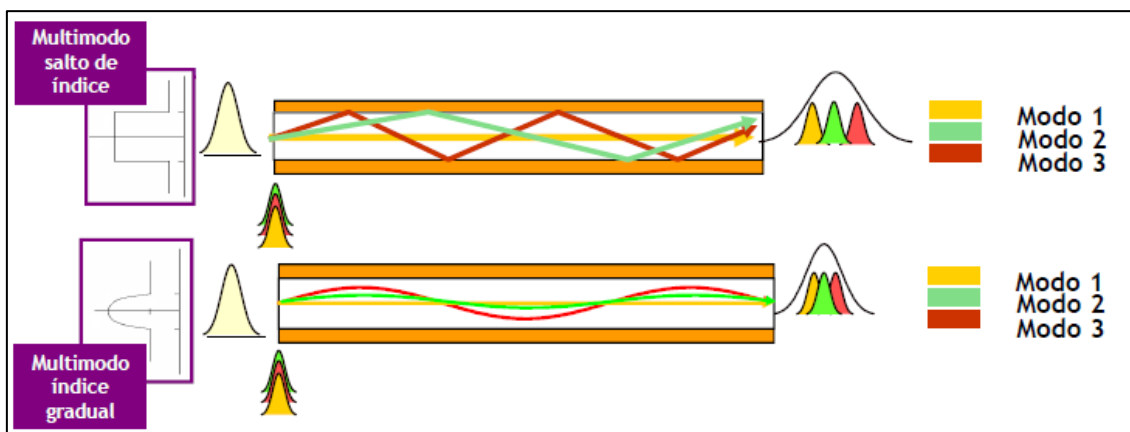


Figura 3: Propagación en fibras de salto de índice y en fibras de índice gradual.

### 2.2.3.Fibra óptica monomodo

A través de la fibra monomodo solamente se propaga un único modo, el modo fundamental. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo hasta que mida unas pocas longitudes de onda (entre  $8\text{ }\mu\text{m}$  y  $12\text{ }\mu\text{m}$ ) y manteniendo una diferencia muy pequeña entre los índices de refracción del núcleo y la cubierta (entre 0.2-1 %) [1].

Las fibras monomodo permiten alcanzar mayores distancias y mayores anchos de banda que las fibras multimodo.

Dentro de las fibras monomodo podemos diferenciar tres atendiendo a la dispersión:

- Estándar S-SMF.
- Dispersión desplazada DS-SMF.
- Dispersión desplazada no nula NZDSF.

Más adelante, en el apartado sobre dispersión, se tratarán las principales ventajas de estas fibras.

### 2.2.4.Efectos lineales: atenuación y dispersión

Aunque la señal en la fibra óptica no sufre interferencias electromagnéticas si se ve afectada por otros efectos negativos como es la atenuación y dispersión. En este apartado se tratarán los principales factores limitantes de la fibra óptica.

### 2.2.4.1. Atenuación

La señal óptica sufre pérdidas a lo largo de la fibra óptica, en este apartado veremos las principales causas de estas pérdidas.

La atenuación ( $\alpha$ ) es linealmente dependiente de la distancia recorrida, aunque no todas las frecuencias sufren la misma atenuación. En la actualidad, en la zona de 1550 nm, las fibras ópticas presentan pérdidas inferiores a 0.2 dB/Km, en torno a los 0.18 dB/Km típicamente.

En la Figura 4 se pueden observar las principales contribuciones a estas pérdidas.

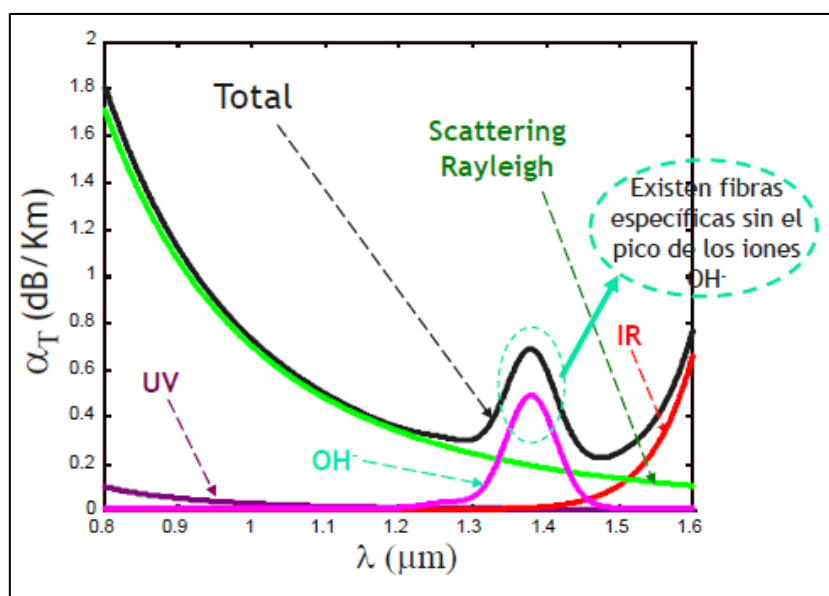


Figura 4: Espectro de atenuación de una fibra óptica de sílice.

Las pérdidas se pueden clasificar en dos grupos:

- **Mecanismos intrínsecos:** inherentes al sílice y por ello no se pueden evitar.
  - Pérdidas por Scattering Rayleigh. Limita a  $\lambda$  bajas.
  - Absorción infrarroja. Solo afecta a longitudes de onda altas (por encima de 1600 nm).
  - Absorción Ultra-Violeta. Su influencia disminuye al aumentar  $\lambda$ .
- **Mecanismos extrínsecos:** causados por impurezas en la fabricación o una incorrecta instalación. Se pueden evitar.
  - Absorción por iones OH. Causado por la presencia de humedad durante la fabricación, este problema es fácilmente evitable mediante las técnicas de fabricación apropiadas.

- Absorción por iones metálicos. Causado por la presencia de impurezas en el sílice. Se puede solucionar mediante técnicas de obtención de sílice de alta pureza.
- Hidrógeno.
- Curvaturas. Fácilmente evitables respetando el radio de curvatura establecido por el fabricante.

### **2.2.4.2. *Dispersión***

Al transmitir una señal a través de una fibra óptica, la señal se ve afectada por la dispersión. A continuación se explicarán las principales clases de dispersión presentes en la transmisión por fibra óptica.

#### **Dispersión Intermodal**

Causado por la presencia de varios modos, solo afecta a la fibra multimodo. Cada modo recorre una distancia distinta a la misma velocidad y eso provoca dispersión entre los distintos modos.

Se soluciona con fibras de índice gradual, como ya se vio en el punto [2.2.2 Fibra óptica multimodo](#).

#### **Dispersión cromática**

Se debe a la dependencia de la constante de propagación con la frecuencia. Aunque solo se propague un modo, este está compuesto por varias componentes frecuenciales que recorren la misma distancia pero a diferente velocidad. Esto causa un ensanchamiento del pulso que puede causar errores.

La dispersión cromática puede limitar la longitud y ancho de banda de un enlace. Este efecto se mitiga mediante fuentes de espectro estrecho (Ej: DFB), mediante fibras DS-SMF y NZDSF y escogiendo cuidadosamente la zona de trabajo (dado que los distintos tipos de fibra tienen diferentes niveles de dispersión dependiendo de la zona).



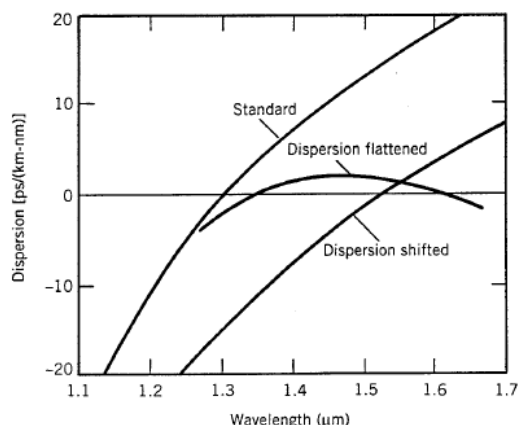


Figura 5: Dispersión en fibras SMF, DS-SMF y NZDSF.

La fibra SMF es la más común. Tiene valores de dispersión típicos de 17 ps/(Km·nm) en 3ª ventana (1550 nm) y un nulo cerca de la 2ª ventana (1310 nm).

La fibra DS-SMF presenta un nivel de dispersión inferior a la fibra SMF y un nulo cerca de los 1500 nm. Si bien un valor nulo de dispersión en principio parece una situación ideal para lograr aumentar la capacidad y el alcance del enlace, cuando se multiplexan varias señales surgen no linealidades (FWM) que afectan negativamente al enlace.

Para solucionar esta situación surge la fibra NZDSF, con niveles de dispersión muy bajos tanto en 2ª como en 3ª ventana (típicamente 5 ps/(Km·nm) en 1500 nm).

### Dispersión por modo de polarización

Dispersión por modo de polarización es causada por un fenómeno llamado birrefringencia. Las polarizaciones vertical y horizontal ven distintos índices de refracción y por lo tanto se propagan a distinta velocidad.

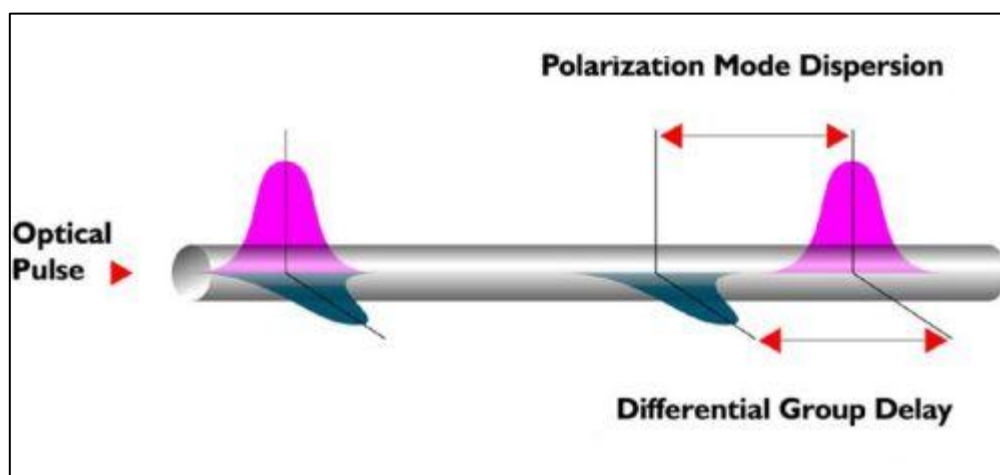


Figura 6: Efecto del PMD en un pulso.

La PMD es un factor a tener en cuenta en enlaces de alta velocidad y largas distancias. Para los casos que supone un factor que limita el enlace se emplean tramos de fibra mantenedoras de polarización.

## 2.2.5.Efectos no lineales

Los efectos no lineales en la fibra óptica pueden perjudicar la transmisión de señales, es por esto que es fundamental tenerlos en cuenta para evitar resultados no deseados. En este apartado se estudiarán brevemente los principales efectos no lineales presentes en la fibra óptica.

### 2.2.5.1. *Scattering Raman Estimulado*

La dispersión (Scattering) causa una transferencia de potencia desde el modo guiado al campo difundido, esto provoca pérdidas adicionales en la fibra óptica. La dispersión no lineal produce pérdidas no lineales.

El Scattering es causado por la interacción de la luz con fonones (vibraciones moleculares de la sílice). La luz dispersada es de menor energía y por tanto menor frecuencia que la luz incidente. En el SRS se genera un fonón óptico (vibración a frecuencias ópticas).

Un parámetro a tener en cuenta es la potencia umbral ( $P_{ot_u}$ ), siempre que se mantenga por debajo, los efectos del SRS no serán significativos. El SRS no supone un problema para sistemas de un solo canal, dado que la potencia umbral es bastante elevada. Por ejemplo para un enlace de 20 Km, una fibra SMF (área efectiva típica de  $80 \mu m^2$ ) y trabajando en 1550 nm la  $P_{ot_u}$  es de 1.8 W. Sin embargo en cuanto se trabaja con más de un canal si es importante tenerlo en cuenta.

Una aplicación de este efecto son los amplificadores Raman, que se valen de este fenómeno para aumentar el nivel de señal.

### 2.2.5.2. *Scattering Brillouin Estimulado*

Al igual que el SRS, el Scattering Brillouin también genera un fonón, pero este se surge a frecuencias acústicas (fonón acústico).

Su influencia también se limita mediante una potencia umbral, definida como la potencia incidente cuya mitad se pierde tras propagarse por una longitud de fibra  $L$ . Una forma de aumentar la potencia umbral es modulando la señal.

La anchura espectral de la ganancia de Brillouin es pequeña (alrededor de 10 MHz), como los pulsos transmitidos suelen tener un espectro más ancho su efecto suele quedar enmascarado por la propia señal. Sin embargo el SBS es importante tenerlo en cuenta cuando se trabaja con fuentes de luz muy estrechas (menores de 20 MHz).

### 2.2.5.3. Automodulación de fase

Es causado por el efecto Kerr: el índice de refracción que experimenta el modo fundamental en una fibra depende débilmente de la potencia que transporta. Es decir, cuando un pulso de suficiente potencia se propaga por la fibra, experimenta un cambio de fase proporcional a dicha potencia.

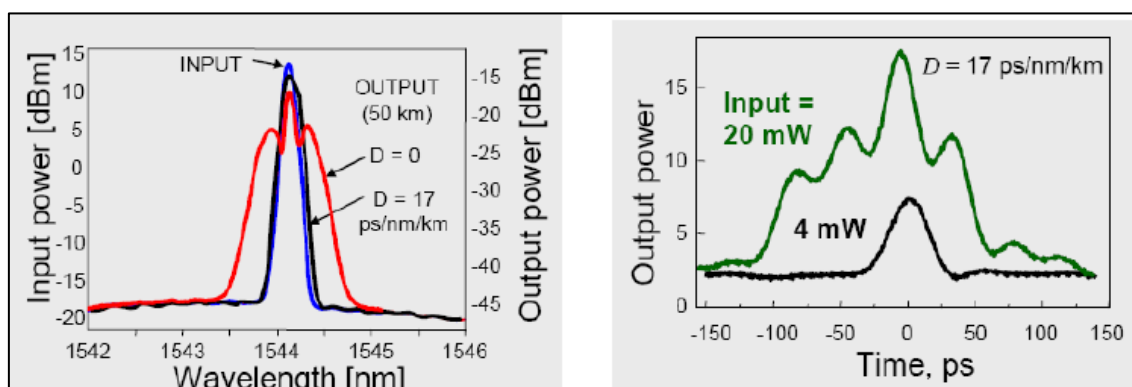


Figura 7: Baja dispersión (iz) y dispersión alta frente a SPM (drch).

El SPM equivale a introducir un chirp (modulación de frecuencia parásita), si la dispersión es elevada el pulso se ensanchará temporalmente más rápido que sin la presencia de SPM. Sin embargo si la dispersión es muy baja se produce un ensanchamiento frecuencial.

Si la dispersión es alta surgirán problemas a alta velocidad, sin embargo si esta es muy pequeña habrá problemas de ISI en sistemas WDM. Por este motivo es importante ser cuidadoso con las fibras ópticas que presentan un nulo de dispersión en la zona de trabajo.

#### 2.2.5.4. Modulación cruzada de fase

En un sistema con varios canales, debido al efecto Kerr, el índice de refracción que ve un canal depende de la potencia que transporta. Cuando conviven varios canales, el cambio de fase no solo depende de la potencia del propio canal, también depende de la potencia de los otros canales.

La modulación cruzada de fase se produce cuando dos canales, que se propagan con distinta velocidad, se superponen en un mismo instante de tiempo. Para canales lo suficientemente separados, un instante tan corto no supone ningún problema, sin embargo pulsos en canales vecinos se pueden superponer el tiempo suficiente como para que el efecto acumulado del XPM suponga un problema. También en este caso un aumento de la dispersión reduce el efecto del XPM.

#### 2.2.5.5. Mezclado de cuatro ondas

Al igual que el SPM y XPM, también se debe al efecto Kerr. El FMW genera nuevas señales ópticas a frecuencias resultado de:  $f_1 \pm f_2 \pm f_3$  (en este caso para un sistema con tres canales a frecuencias  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$ ).

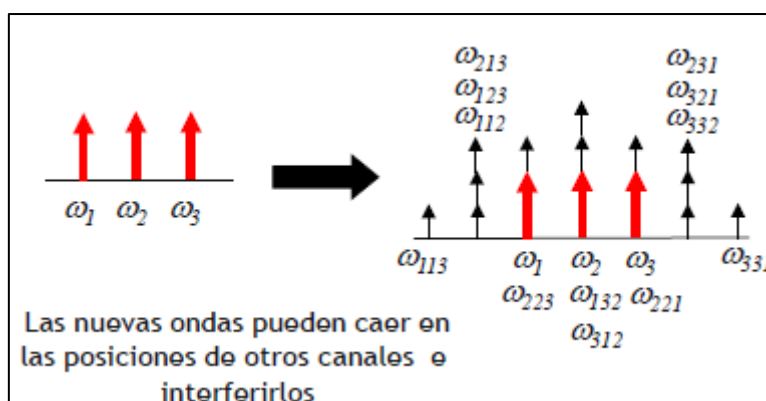


Figura 8: FWM de 3 canales.

El mezclado de cuatro ondas puede suponer un importante problema en cuanto al nivel de potencia, ya que surgen nuevas frecuencias en detrimento de la potencia de los canales del sistema.

Algunas de las causas de este efecto es un elevado nivel de potencia total (entre todos los canales) y proximidad entre canales. El FMW crece al reducir la dispersión, de nuevo vemos

la importancia de la dispersión a la hora de reducir los efectos no lineales. Emplear canales no equiespaciados evita las interferencias con otros canales.

## 2.3. Fundamentos de la emisión óptica

Para abordar este tema es necesario entender la interacción entre la luz y un material semiconductor, y antes de esto es necesario definir la luz. La luz está compuesta por una serie de partículas conocidas como fotones, estos no tienen masa y transportan energía electromagnética. La energía de la luz está cuantizada en niveles separados por  $E$  (la energía asociada a un fotón).

La emisión óptica en un semiconductor se puede explicar mediante tres mecanismos básicos:

- a) Absorción
- b) Emisión espontánea
- c) Emisión estimulada

### 2.3.1. Absorción

Los átomos están compuestos por electrones orbitando alrededor del núcleo. Los electrones están situados en un nivel de baja energía, la banda de valencia. Los electrones tienen la capacidad de absorber energía y pasar a un nivel de energía mayor, la banda de conducción.

En la emisión óptica la energía procede de la luz, es decir, para que un electrón pase a un estado de energía mayor es necesario que absorba una cantidad de luz equivalente a la energía de un fotón.

$$E = h * v$$

$E$ : Energía asociada a un fotón.

$h$ : Constante de Planck ( $6.63 \cdot 10^{-34}$  J\*s).

$v$ : Frecuencia de la onda asociada al fotón.

La energía del fotón es igual a la diferencia de energía entre la banda de valencia y conducción (esta separación se conoce como gap) y determina las propiedades eléctricas del material, clasificándolo como metal, semiconductor o aislante.

El ratio al que los electrones pasan de la banda de valencia a la de conducción depende de los fenómenos de emisión espontánea y estimulada [2].

### 2.3.2. Emisión espontánea

Un electrón en la banda de conducción siempre vuelve espontáneamente a la banda de valencia, pero para que esto suceda primero debe perder energía. Cuando esto sucede la energía se libera en forma de fotón [3].

Este proceso es la emisión espontánea, cuyo resultado es un fotón de fase y dirección de propagación arbitrarias, con energía correspondiente al salto dado y una frecuencia dependiente del gap. La emisión espontánea es el mecanismo empleado en las fuentes LED.

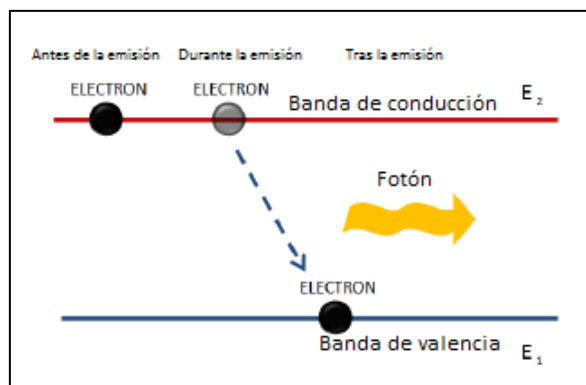


Figura 9: Emisión espontánea [2].

### 2.3.3. Emisión estimulada

Un fotón incidente, con la energía necesaria, puede estimular un electrón a pasar de la banda de valencia a la banda de conducción. El fotón generado, tras la caída del electrón, tiene la misma frecuencia y fase que el fotón incidente [3]. Este fenómeno se conoce como emisión estimulada. La emisión estimulada es el principio tras el funcionamiento de los láseres.

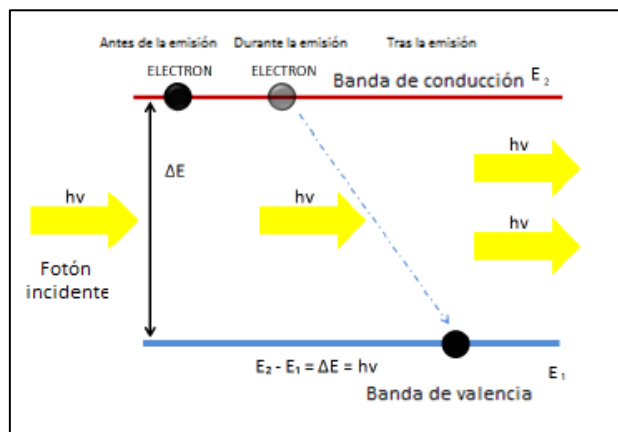


Figura 10: Emisión estimulada [2].

## 2.4. Amplificación óptica

Una de las grandes ventajas de la fibra óptica frente a otros sistemas de transmisión es su baja atenuación, especialmente en la 3ª ventana que presenta 0.18 dB/Km típicamente. Aun así, en ocasiones es necesario amplificar la señal y aquí es donde entran los amplificadores ópticos. Estos se encargan de amplificar la señal sin necesidad de conversión al dominio eléctrico. Las principales ventajas de evitar el dominio eléctrico se pueden resumir en:

- No están limitados en velocidad al no emplear circuitos electrónicos.
- Independientes de la velocidad de transmisión o modulación de la señal.
- En los sistemas WDM se puede emplear un solo amplificador para todos los canales.

Sin embargo también presentan algunas desventajas, la ganancia no es plana en  $\lambda$ , introduce ruido ASE y sólo amplifican, no regeneran la señal.

En este punto se estudiarán los principales métodos y dispositivos empleados para amplificar las señales ópticas.

### 2.4.1. Conceptos básicos

El funcionamiento de la mayoría de los amplificadores ópticos se basa en la emisión estimulada. Su funcionamiento es similar al de un láser pero sin realimentación, la ganancia óptica se obtiene al aplicar un bombeo (eléctrico u óptico) al amplificador para lograr la inversión de población y así lograr que la emisión estimulada predomine frente a la absorción [4]. De esta manera, cuando los fotones estimulantes atraviesan el amplificador, se obtienen

fotones con las mismas características logrando la amplificación óptica.

Existen varios tipos de amplificadores atendiendo a los fenómenos en los que se basan para lograr la amplificación óptica. Si bien se comentarán brevemente los amplificadores Raman y SOA, nos centraremos más en el amplificador EDFA dado que es sobre el que se apoya en este trabajo.

## 2.4.2. Amplificadores basados en efectos no lineales

### 2.4.2.1. Amplificadores Raman

Se basan en el fenómeno Scattering Raman estimulado. A diferencia de la emisión estimulada, donde un fotón estimula la emisión de otro idéntico sin perder su energía, en SRS el fotón incidente pierde su energía para crear otro de menor energía a menor frecuencia. La energía sobrante es absorbida por el material en forma de un fonón óptico.

Para obtener ganancia de un amplificador Raman es necesario un bombeo óptico, la amplificación se logra al transferir energía del bombeo al a señal mediante el SRS mientras ambas señales se propagan en la fibra [4].

Suele emplearse un bombeo 13 THz por debajo de la  $\lambda$  a amplificar, es decir, para amplificar entre 1550 nm y 1600 nm se bombea a 1460-1480 nm.

Sus principales ventajas se pueden resumir en:

- Permite amplificar 2º y 3º ventana (EDFA solo amplifica 3º ventana).
- Se pueden emplear distintas  $\lambda$  de bombeo con diferentes potencias para lograr un espectro de ganancia plano.

Sin embargo son necesarias potencias de bombeo del orden de 1 W, causa diafonía entre canales en WDM y las fluctuaciones de potencia son ruido para la información. Estos dos últimos inconvenientes se minimizan empleando esquemas contra-propagantes (se bombea en dirección opuesta a la señal).



## 2.4.3. Amplificadores basados en emisión estimulada

### 2.4.3.1. Amplificadores ópticos de semiconductor

Los amplificadores SOA tienen una estructura muy similar a la de un láser, la única diferencia se encuentra en la realimentación. Mientras un láser basa su funcionamiento en ella, en los SOA se evita para que no se comporten como osciladores.

La amplificación se logra mediante la emisión estimulada, la luz incidente genera luz a la salida con las mismas características. En este caso la inversión de población se logra mediante bombeo eléctrico.

Ventajas:

- Amplio ancho de banda (unos 100 nm).
- Fácilmente integrable.
- Bombeo eléctrico.

En cuanto a las desventajas: los SOA son sensibles a la polarización, tienen mayores pérdidas de inserción y PDL que otros amplificadores, introducen diafonía en WDM y más ruido.

### 2.4.3.2. Amplificadores de fibra dopada con Erbio

Otra manera de lograr amplificación óptica es empleando fibra dopada, dependiendo del material dopante se amplifica una banda frecuencial u otra. Entre los elementos dopantes más habituales se encuentran el Erbio, el neodimio y el Iterbio [2]. Las fibras dopadas con Erbio son las más habituales, este tipo de fibras logran amplificar en la 3ª ventana.

Los iones de Erbio forman un sistema de tres niveles (banda de bombeo, banda metaestable y banda de referencia), que proporcionan una amplia ganancia centrada en 1550 nm. Los iones de Erbio necesitan alta intensidad de bombeo para lograr la inversión de población, para lograrlo se emplea como bombeo láseres que emiten en 980 nm y 1480 nm [2].

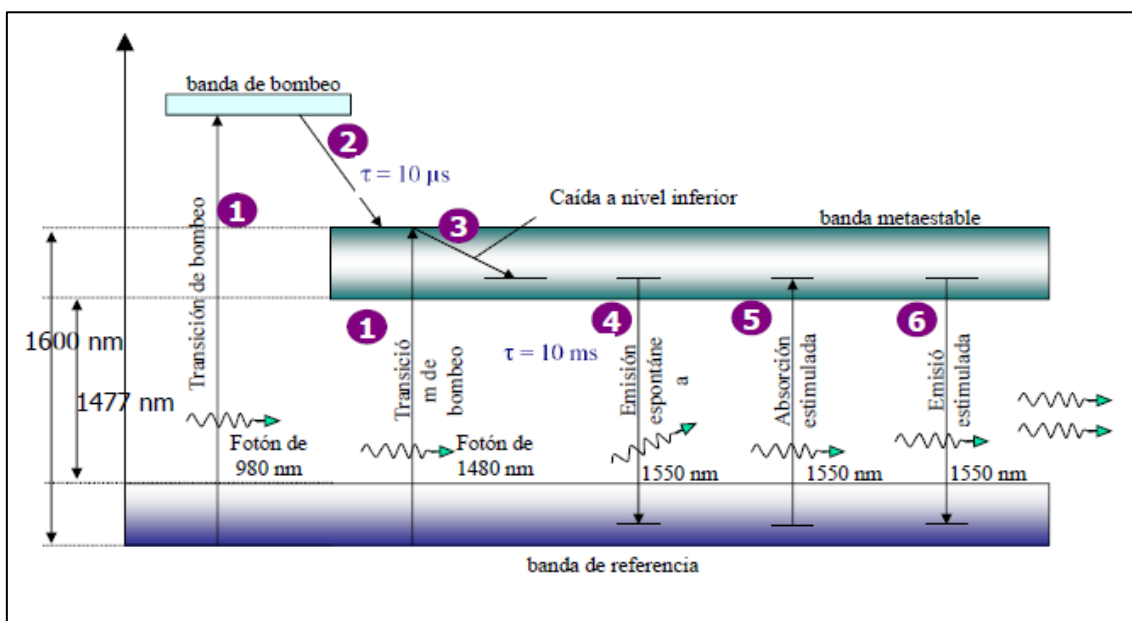


Figura 11: Diagrama de bandas EDFA.

Los EDFAs se basan en los fenómenos de emisión espontánea y emisión estimulada. El láser de bombeo excita los iones de Erblio trasladándolos a un nivel de mayor energía, la banda de bombeo. Estos iones decaen rápidamente a la banda metaestable sin perder energía. Los fotones, con longitud de onda entre 1520 y 1570 nm, se generan cuando los iones pasan de la banda metaestable a la banda de referencia [2].

El bombeo más común es el de 980 nm, dado que produce más ganancia y menos ruido, sin embargo también existe la posibilidad de bombear a 1480 nm. Al bombear en 1480 nm se puede lograr mayor potencia de salida (mediante alta potencia de bombeo) y también permite que el bombeo viaje con la información (bombeo desde la cabecera).

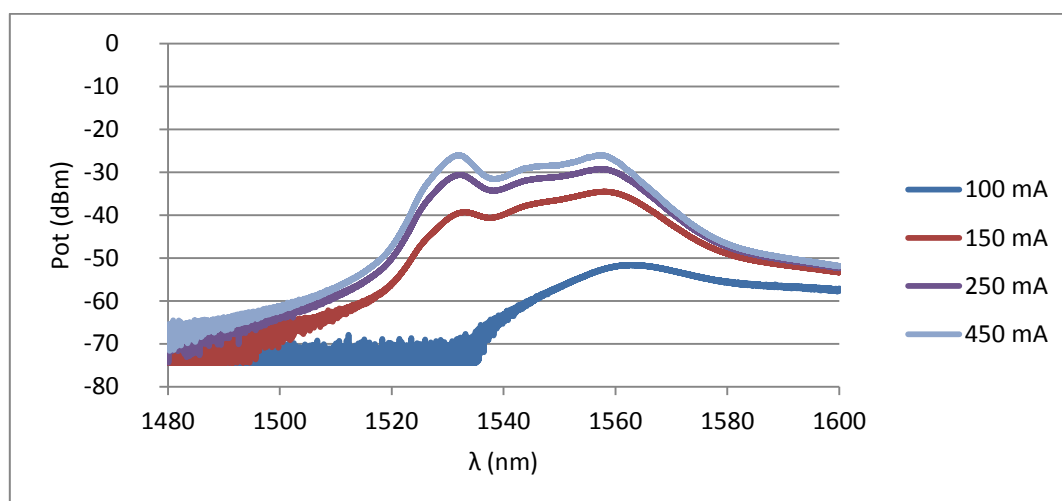
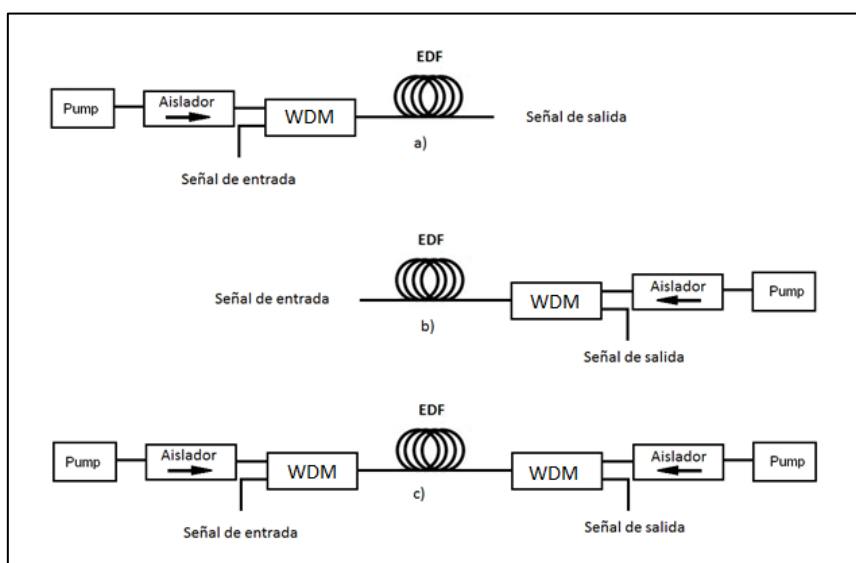


Figura 12: Comportamiento de un EDFA frente a distintas intensidades de bombeo.

Como se ve en la Figura 12, el espectro de la ganancia no es plano, esto puede suponer un problema en sistemas con varios canales. Este problema se soluciona mediante el empleo de ecualizadores, distintos materiales dopantes que logran una ganancia plana o simplemente controlando la potencia de bombeo (menor potencia espectro más plano).

Existen tres esquemas básicos para la implementación de un EDFA: con bombeo copropagante, con bombeo contrapropagante y una combinación de ambos.



**Figura 13: a) Bombeo copropagante b) Bombeo contrapropagante c) Combinación de ambos.**

El bombeo copropagante produce menos ruido mientras que el contrapropagante es más eficiente respecto a la ganancia.

### Ruido en los EDFA

El ruido de un EDFA viene producido principalmente por el proceso de emisión espontánea (Amplified Spontaneous Emission - ASE). Durante el bombeo se producen emisiones espontáneas de fotones, que al propagarse por el propio EDFA son amplificados en la banda de la 3ª ventana.

Existen dos tipos de ASE dependiendo del sentido de propagación con respecto al de la señal de entrada. Si es en el mismo, se conoce como ASE+ o FASE (Forward Amplified Spontaneous Emission), y si es en sentido contrario se tendrá ASE- o BASE (Backward Amplified Spontaneous Emission) [5].

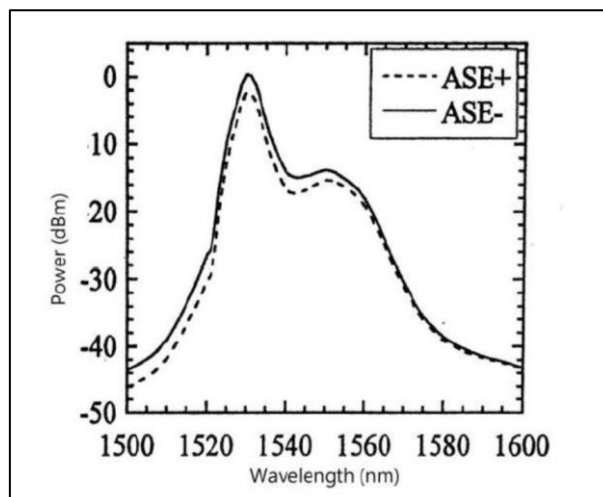


Figura 14: Espectro del ruido ASE.

En la Figura 14 se puede ver una comparación de ambos para un sistema en el que el bombeo se realiza en el mismo sentido al de la señal a amplificar. La forma del ASE se aproxima a la de la curva de la ganancia del EDFA.

## 2.5. Láser de fibra óptica

El funcionamiento de un láser se basa en la emisión estimulada sumada a un mecanismo de realimentación positiva. Cuando se dan las dos condiciones se produce la oscilación láser.

Un láser consta de tres partes fundamentales: el bombeo, encargado de la estimulación, la cavidad que confina la luz, encargada de la realimentación, y un medio activo, un material con ganancia que genere más fotones de los que absorbe.

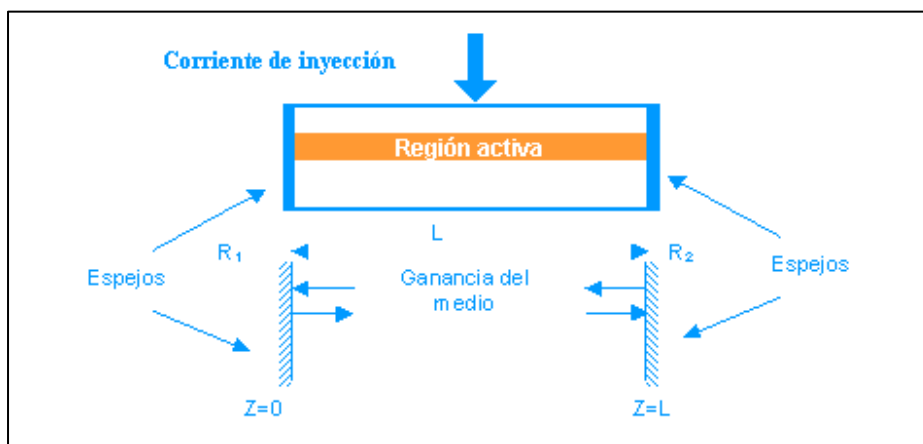


Figura 15: Cavidad Fabry-Perot.

Un láser de fibra se consigue al combinar un bombeo óptico, una fibra dopada como medio amplificador y una cavidad. El bombeo estimula el medio amplificador provocando la inversión de población y emisión estimulada, y la cavidad confina la luz, de manera que esta atraviesa el medio amplificador varias veces. La zona de emisión de la fibra dopada y la cavidad determinan la frecuencia óptica de trabajo del láser.

### 2.5.1. Láser de fibra óptica dopada con Erblio y configuración en anillo

Esta clase de láser de fibra emplea fibras dopadas con Erblio como medio amplificador, bombeo óptico en 980 nm y una configuración en anillo como cavidad.

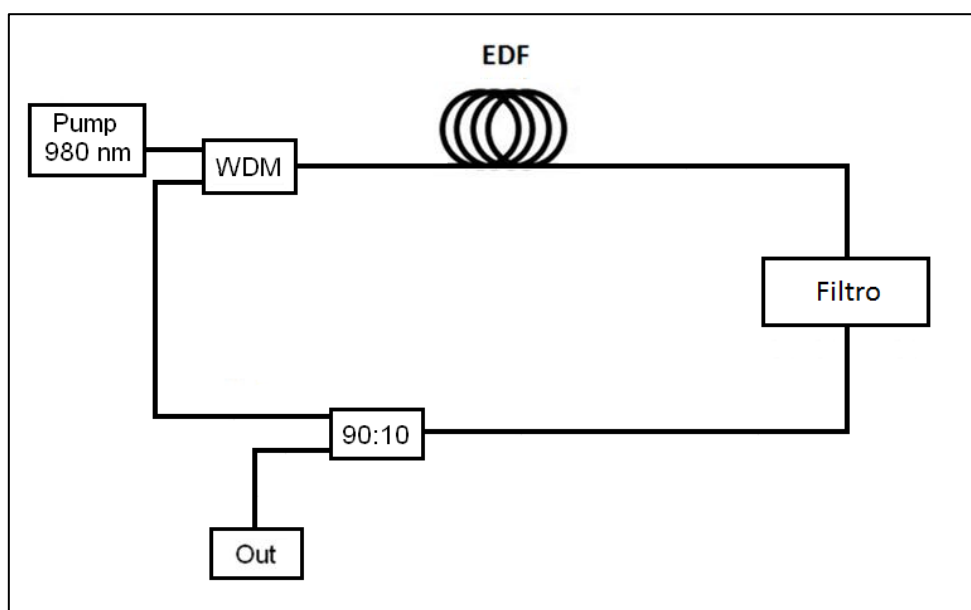


Figura 16: Láser de EDF en configuración de anillo.

El bombeo se encarga de lograr la inversión de población y la emisión estimulada en la fibra dopada con Erblio. La configuración en anillo permite implementar la realimentación de forma sencilla sin necesidad de usar espejos. La fibra dopada con Erblio (EDF) trabaja en torno a los 1520-1570 nm. Un selector de longitud de onda en la cavidad escoge la zona de emisión (dentro de la zona de trabajo de la EDF) y la anchura del láser. El bombeo se introduce mediante un WDM a través del puerto de 980 nm. Mediante el puerto de 1550 nm se agrega la realimentación y ésta junto al bombeo sale por el puerto común.

El acoplador, tras el filtro del anillo, se encargaría de obtener la señal de salida por un puerto y de mantener la realimentación del anillo por el otro. Como seguridad es recomendable emplear un aislador de 980 nm entre el bombeo y el WDM para asegurarse que ninguna reflexión llegue al bombeo.

Para la optimización de este tipo de configuraciones es importante tener en cuenta la concentración de Erblio y la longitud del EDF. Cuanto mayor es la concentración más ganancia y ancho de banda se obtiene y menor es el nivel de ruido [6]. Respecto a la longitud, hay un valor óptimo dado un bombeo.

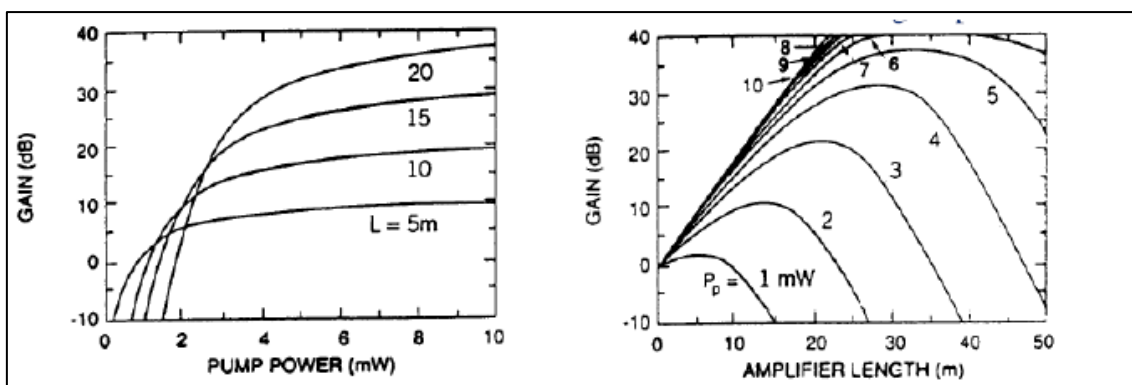


Figura 17: Relación del bombeo y la ganancia en un EDF [7].

También es importante la relación de acoplo, que decide cuanta luz se obtiene a la salida y cuanta se realimenta. A mayor relación de acoplo en la realimentación mayor es la amplificación obtenida en el EDF (siempre que no superemos la ganancia de saturación) y por tanto mayor la señal de salida, pero un valor de acoplo demasiado pequeño de salida implica un nivel de señal muy pequeño también lo que podría suponer un nivel muy bajo de SNR.

### 2.5.1.1. Limitaciones del láser

#### Forma de la ganancia

El comportamiento de la ganancia del medio amplificador resulta un parámetro muy relevante en cuanto a las limitaciones finales del láser. Dentro de este campo podemos hacer dos diferenciaciones básicas entre medio homogéneo e inhomogéneo.

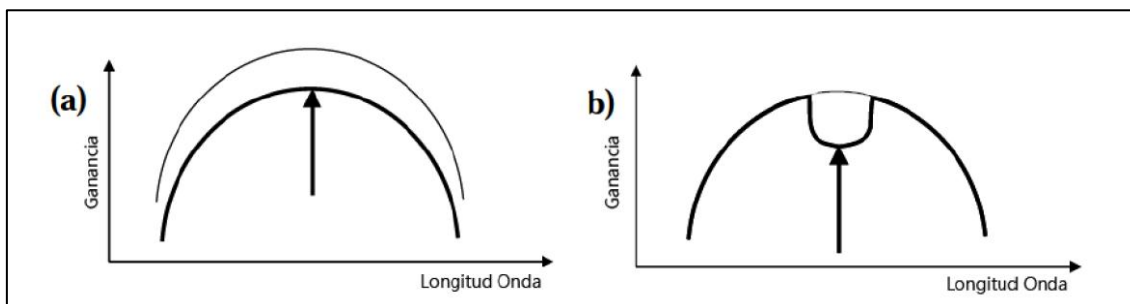


Figura 18: a) Curva de ganancia sin saturar (línea delgada) y saturada (línea gruesa) para un medio homogéneo. B) Para un medio inhomogéneo.

A temperatura ambiente un EDFA se comporta de forma homogénea, siendo la principal causa de este fenómeno el tiempo de vida del estado excitado, al saturarse a una longitud de onda la energía de los estados excitados se reduce provocando una reducción de la emisión espontánea. Esto es un problema para la generación de láseres de EDF con múltiples longitudes de onda, las variaciones de amplitud de una de ellas modificarían la curva de ganancia del amplificador y por lo tanto afectaría directamente a la amplitud del resto de longitudes de onda provocando inestabilidades. Sin embargo es posible conseguir que un EDFA se comporte de forma inhomogénea enfriando la EDF [5].

### Spatial hole burning

El spatial hole burning es un proceso que se da en los láseres de fibra en configuración en anillo. Es una distorsión o deformación de la forma de la ganancia (o pérdidas en el espectro de un medio absorbente saturable), causado por los efectos de una onda estacionaria que se genera.

Si se superponen dos señales ópticas de ancho de banda estrecho, que viajan en ambos sentidos dentro del anillo, éstas formarán un patrón denominado interferencia de onda estacionaria, cuyo periodo es la mitad de la longitud de onda. Y en un medio de ganancia láser, tendrá dos efectos importantes:

- La ganancia está saturada preferentemente en los antinodos.
- La amplificación resultante está dominada por la densidad de excitación en dichos antinodos, los nodos no son “vistos” por la señal óptica.

Una solución consiste en impedir la circulación de las señales en ambos sentidos, mediante aisladores o circuladores ópticos [5].

### 2.5.1.2. Láseres multilínea

Los láseres multilínea tienen una gran importancia hoy en día, sus aplicaciones son muy variadas. Su uso es fundamental en sistemas de multiplexado de longitud de onda, sensores ópticos, instrumentación, procesamiento de señales... Existen láseres multilínea de semiconductor al igual que de fibra óptica. En este estudio nos centraremos en los MEDFRL.

A la hora de diseñar un MEDFRL se han estudiado diversas aproximaciones, láseres con distintas configuraciones de cavidad, realimentación distribuida... Cada configuración con sus ventajas y aplicaciones respecto al resto. El p

El principal objetivo de un MEDFRL es el de lograr un gran número de longitudes de onda sintonizables con buena potencia de salida, buen OSNR, espectro lo más plano posible, funcionamiento SLM (Single Longitudinal Mode) y ajuste y colocación precisos de frecuencias [8].

Como ya se vio en el apartado anterior, [2.5.1.1 Limitaciones del láser](#), la EDF se comporta de forma homogénea a temperatura ambiente. Esto supone un problema en cuanto a la estabilidad del sistema. Una solución a este problema consistiría en enfriar la EDF. Otro problema de los MEDFRL es la necesidad de ecualizar los canales. El espectro del EDF no es plano, esto significa que cada canal tendrá una amplitud distinta. Para evitar este problema se emplean atenuadores que regulan el nivel de potencia de cada canal.

#### Modos

Los láseres de fibra óptica con configuración en anillo tienen una función de transferencia propia, se generaran resonancias a determinadas longitudes de onda o modos longitudinales. Éste es un factor importante en el diseño de láseres de fibra, ya que la presencia de varios modos provoca inestabilidades al existir competencia entre ellos. Lo ideal es conseguir que el sistema sea monomodo, consiguiendo así mejores condiciones de estabilidad.

El número de modos longitudinales viene definido por la siguiente expresión:

$$N = \frac{n * L}{\lambda}$$

N: Número de modos longitudinales.

N: Índice de refracción de la fibra.

L: Longitud total del anillo.

$\lambda$ : Longitud de onda del láser.



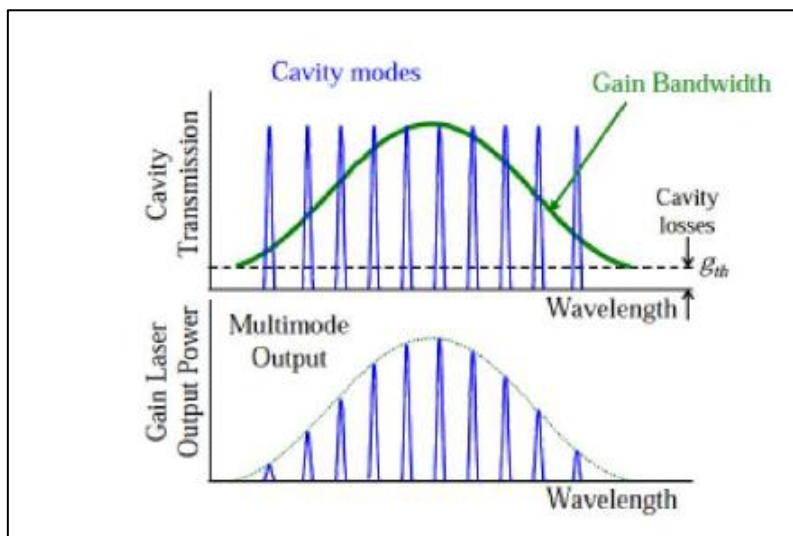


Figura 19: Espectro modos y curva de ganancia por separado (arriba) y modos amplificados (abajo) [9].

### Doble cavidad

Un método para reducir el número de modos del láser es la configuración con doble anillo mediante acopladores. De esta manera la función de transferencia total de la cavidad será la multiplicación de las funciones de transferencia de cada uno de los anillos. Si se configura de forma que sólo pueda existir un único modo de resonancia, tendremos un láser monomodo.

### Absorbente saturable

Es un método utilizado para lograr mayor estabilidad. Se basa en introducir un tramo de una determinada longitud de fibra dopada con Erbio (EDF) sin bombeo. De esta forma se comportará como un medio absorbente.

A mayor concentración de dopante, mayor será el efecto de absorción del medio, evitando así que algunos modos naturales de la cavidad de nuestro sistema no alcancen la condición láser y favoreciendo la estabilidad del mismo [9].

### Efecto de la supresión inducida de modos longitudinales

Este efecto se consigue mediante la ecualización del sistema a través de atenuadores variables en cada rama, de manera que ambas longitudes de onda tengan el mismo nivel de potencia óptica de salida.

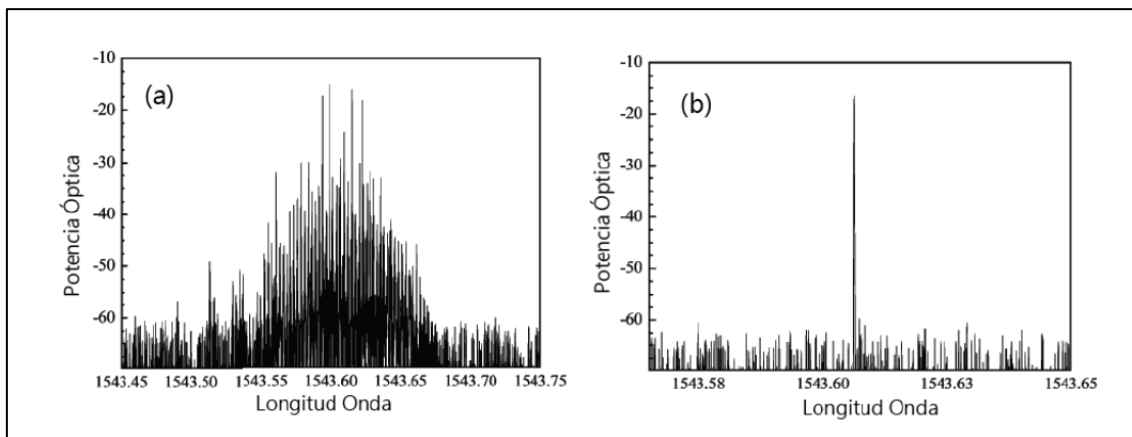


Figura 20: a) Espectro óptico salida multimodo para  $\lambda_1$ . B) Espectro de salida monomodo para  $\lambda_1$ . [9]

## 2.6. Dispositivos ópticos pasivos

En este apartado se describirán brevemente los componentes pasivos empleados a lo largo del trabajo.

### 2.6.1. Multiplexor en longitud de onda

Un WDM es un componente bidireccional y selectivo en longitud de onda. En un sentido el WDM combina las señales (multiplexor) y en el sentido opuesto las divide en longitud de onda (demultiplexor).

Es un componente imprescindible en sistemas con varios canales, dado que permite la separación o agregación de los distintos canales.

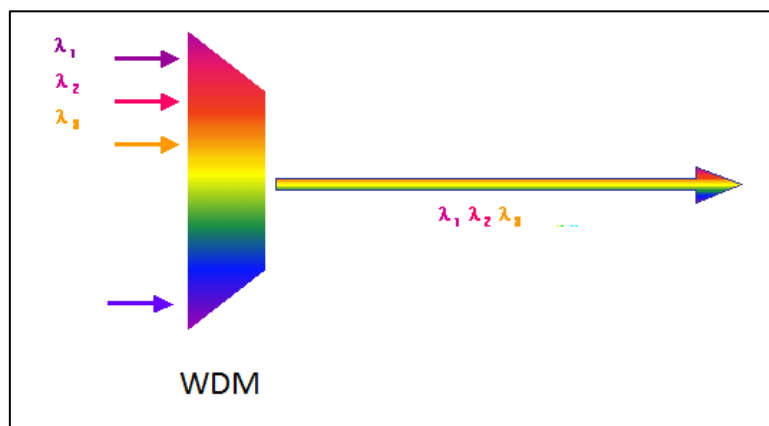


Figura 21: Esquema básico de un WDM.

Los principales parámetros a tener en cuenta son.

- Pérdidas de inserción
- Aislamiento de un canal respecto al resto (cuando funciona como demultiplexor).
- Longitud de onda de trabajo.
- Pérdidas de retorno.
- PLD.

### 2.6.2. Acoplador óptico

Un acoplador óptico es un elemento bidireccional capaz de combinar y dividir señales ópticas. A diferencia del WDM no separa canales, un acoplador reparte o combina el nivel de señal óptica entre las salidas.

Existen muchos tipos de acopladores con distinto número de entradas y salidas (2x2, 1x4, 2x8 etc...) y diferentes relaciones de acoplo (50:50, 30:70, 25:25:25:25 etc...).

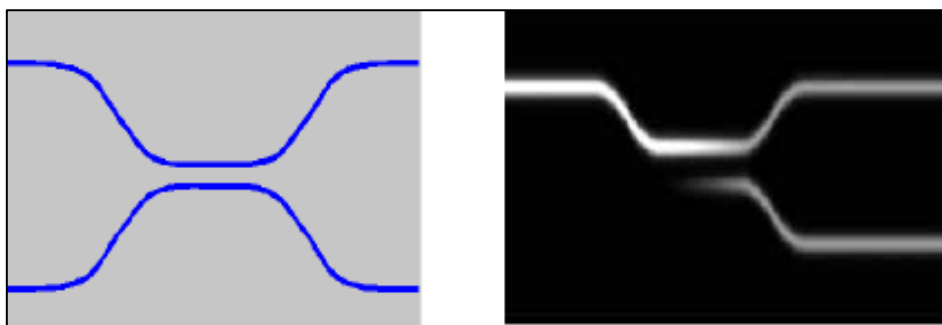


Figura 22: Acoplador 2x2.

Entre los parámetros fundamentales que caracterizan un acoplador se encuentran:

- Relación de acoplo.
- Pérdidas de inserción.
- Directividad.
- Longitud de onda de trabajo.
- PLD.
- Tipo de fibra óptica.

### 2.6.3.Circulador

Un circulador es una clase de acoplador con unas propiedades particulares, solo permite la circulación de la luz en ciertos sentidos. Tomando como referencia la Figura 23, un circulador de tres puertos solo permite el paso de luz del puerto 1 al 2, del puerto 2 al 3 y del puerto 3 al 1. Para el resto de casos actúa como un aislador.

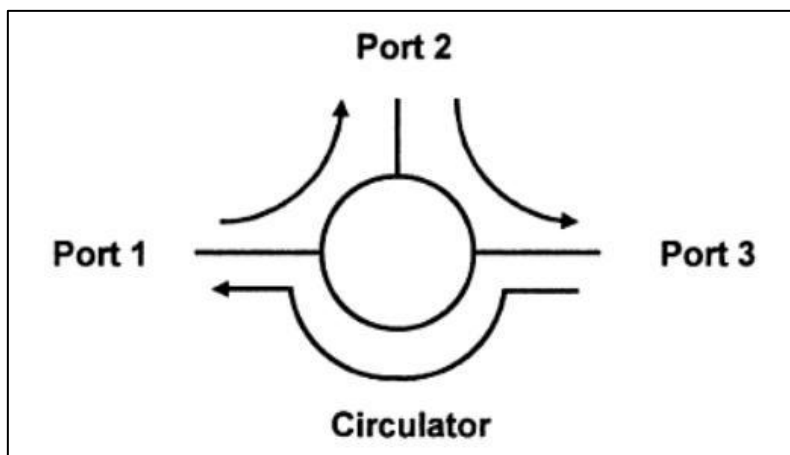


Figura 23: Esquema básico del funcionamiento de un circulador de tres puertos.

Respecto a los parámetros fundamentales.

- Longitud de onda de trabajo.
- Pérdidas de inserción.
- PLD.
- Directividad.
- Pérdidas de retorno.
- Nivel máximo de potencia.

### 2.6.4.Aislador óptico

Un aislador óptico permite el paso de la luz en una única dirección, eliminando las reflexiones. Su funcionamiento se basa en un elemento llamado Rotador de Faraday, este rota la polarización de la luz al ser atravesado. Esta rotación es siempre la misma y viene caracterizada por la longitud del rotador y la constante de Verdet del material.

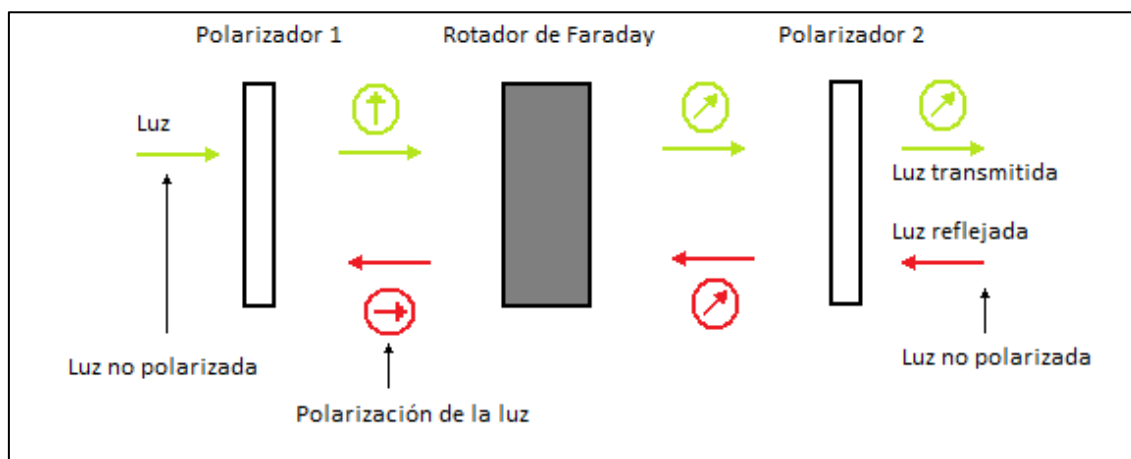


Figura 24: Esquema de un aislador óptico.

Este sistema presenta una desventaja, la mitad de la luz se pierde en el polarizador. Sin embargo existen otros diseños más complejos que solucionan el problema.

Es importante conocer:

- La longitud de onda de trabajo.
- Pérdidas de inserción
- PLD.
- Máxima PMD.
- Nivel máximo de potencia aceptado.
- Pérdidas de retorno mínimas.

### 2.6.5. Atenuador óptico

Es un elemento cuya función es la de regular el nivel de señal. Sus principales funciones son ecualizar y proteger el sistema frente a niveles de potencia muy altos.

Existen dos tipos de atenuadores ópticos: fijos y variables. Los atenuadores fijos tienen un valor de atenuación constante, mientras que los atenuadores variables permiten ajustar las pérdidas de forma controlada.

Generalmente la variación de atenuación suele controlarse mediante un sistema mecánico (un tornillo), que actuando sobre la fibra (enroscándola, presionándola...) provoca las pérdidas. Existen otros sistemas más avanzados que no causan tanta fatiga a la fibra óptica limitando la vida útil del atenuador.



**Figura 25: Atenuador variable**

Entre los parámetros a tener en cuenta se encuentran:

- Longitud de onda de trabajo.
- Rango de atenuación.
- Pérdidas de retorno.
- Pérdidas de inserción.

## **2.7. Sensor de fibra óptica**

Un sensor óptico es un elemento que modula algún parámetro de la luz que se transmite provocando un cambio en las características de la señal recibida en el receptor. Estos cambios pueden encontrarse en la fase de la señal, la amplitud, la longitud de onda o la polarización.

Las principales ventajas del uso de sensores de fibra óptica se pueden resumir en.

- Inmunidad frente a interferencias electromagnéticas.
- Peso y tamaño reducidos.
- La baja atenuación permite alcanzar mayores distancias.
- Se pueden multiplexar fácilmente numerosos sensores en una misma red.
- Seguros en zonas peligrosas (zonas con riesgo de explosión, inflamación...).
- Gran resistencia a temperaturas altas.



**Figura 26: Sensores Bragg de fibra para medir temperatura y deformación en una estructura. J.M. López Higuera. Universidad de Cantabria.**

Existen numerosas áreas de aplicación, dependiendo de la tecnología empleada, un sensor óptico puede utilizarse para monitorizar temperatura, presión, velocidad, campos eléctricos/magnéticos, vibración, ondas acústicas, humedad etc...

En este trabajo nos centraremos en el uso de redes de difracción Bragg para la medición de temperatura a través de la longitud de onda.

### 2.7.1. Redes de difracción Bragg

Una red de difracción de fibra óptica es una perturbación periódica o cuasiperiódica del índice de reflexión del núcleo de la fibra a lo largo de la misma, formando una estructura que refleja la luz que le llega de forma selectiva con la longitud de onda [10].

La señal reflejada se encuentra en la longitud de onda de Bragg:

$$\lambda_B = 2 * n_{eff} * \Lambda$$

$\lambda_B$ : Longitud de onda de Bragg.

$n_{eff}$ : Índice de refracción efectivo de la fibra.

$\Lambda$ : Periodo de modulación del índice de refracción.

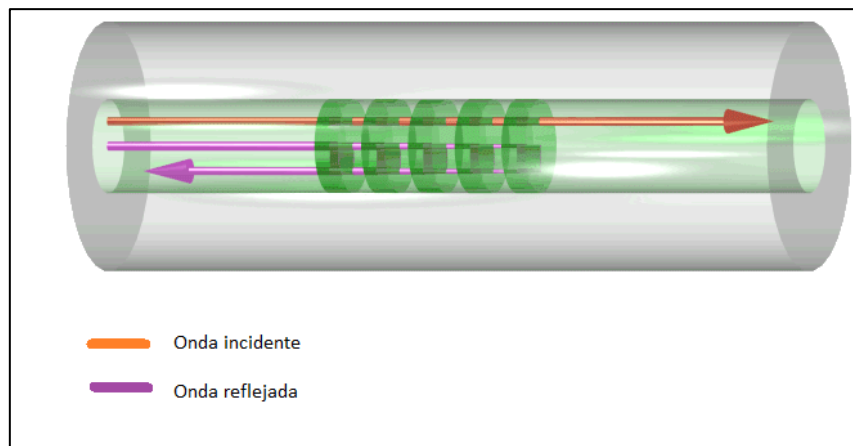


Figura 27: Esquema del funcionamiento de un FBG.

En una red de difracción Bragg uniforme el cambio de índice de refracción es constante en toda su longitud. Los distintos tipos de FBGs se crean variando la modulación del índice de refracción. Su fabricación se basa en el cambio del índice de refracción de la fibra al incidir luz ultravioleta.

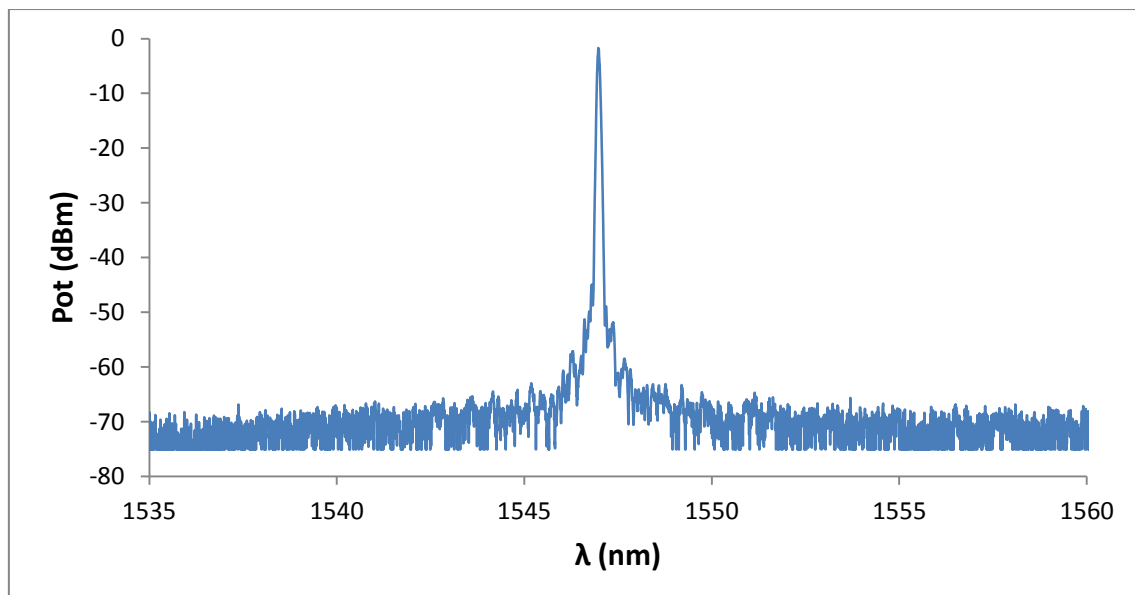


Figura 28: Respuesta FBG con  $\lambda_B$  de 1547 nm.



El funcionamiento de un FBG es similar a un filtro. Partiendo de la [Figura 12](#) como señal de entrada, el FBG reflejará un alto porcentaje (99 % típicamente) de la señal situada en  $\lambda_B$ . Para la Figura 28,  $\lambda_B = 1547$  nm. En cuanto a la salida del FBG, obtendremos la señal de entrada salvo la zona reflejada.

El espectro de un FBG es extremadamente estrecho, del orden de 0.12 nm. Por esta razón los FBGs son elementos muy usados en el diseño de láseres de fibra, para lograr láseres de espectro estrecho.

En este trabajo los FBGs se emplearán tanto como selectores de  $\lambda$  para generar los picos del láser de fibra como sensores.

### 2.7.2.FBG como sensor

La utilidad de un FBG como sensor viene relacionada con  $\lambda_B$ . Variaciones en  $n_{\text{eff}}$  y  $\Lambda$  son las que determinan la longitud de onda de Bragg. Midiendo el cambio de  $\lambda_B$  se pueden monitorizar los fenómenos que causan esta alteración en la fibra.

Si bien un FBG puede emplearse para medir presión, campo eléctrico/magnético, vibraciones y deformaciones entre otras aplicaciones, en este punto nos centraremos en su funcionamiento como sensor de temperatura.

La temperatura afecta al índice de refracción y a la expansión térmica del coeficiente de la fibra. Para un incremento de temperatura, el correspondiente incremento en longitud de onda viene dado por [11]:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (\alpha - \xi) \Delta T \approx \lambda_B (1 - \xi) \Delta T$$

$\Delta T$ : incremento de temperatura.

$\Delta \lambda_B$ : incremento de longitud de onda

$\xi$ : coeficiente termo óptico de la fibra.

$\alpha$ : coeficiente de expansión térmica.

De esta manera cambios en la temperatura alteran el valor de  $\lambda_B$  y monitorizando su incremento se obtiene un sensor de temperatura mediante un FBG.

### **3. Láser multi-longitud de onda de fibra dopada con erbio con realimentación en anillo para medición remota de temperatura.**

#### **3.1. Introducción**

En este apartado se llevará a cabo el estudio del funcionamiento y optimización del láser multi-longitud de onda de fibra dopada con erbio y realimentación en anillo. Para ello se partirá de un diseño inicial al que se le añadirá un anillo de estabilidad con el objetivo de reducir las inestabilidades en tiempo y potencia, a continuación se probarán distintas relaciones de splitter de salida.

Una vez optimizado el sistema se estudiará su comportamiento como sensor de temperatura. Tras este paso se diseñará el sistema remoto y se concluirá con la implementación del sistema como sensor de temperatura remoto.

#### **3.2. Desarrollo experimental del circuito básico**

##### **3.2.1. Esquema inicial**

Este trabajo propone un diseño básico de láser multilínea en el que se llevarán a cabo distintos cambios para estudiar su comportamiento óptimo. Finalmente el sistema que mejor se comporte se empleará como sensor de temperatura.

A continuación se describirá el circuito básico, representado en la Figura 29 (las especificaciones de los componentes utilizados se encuentran en el Anexo A).

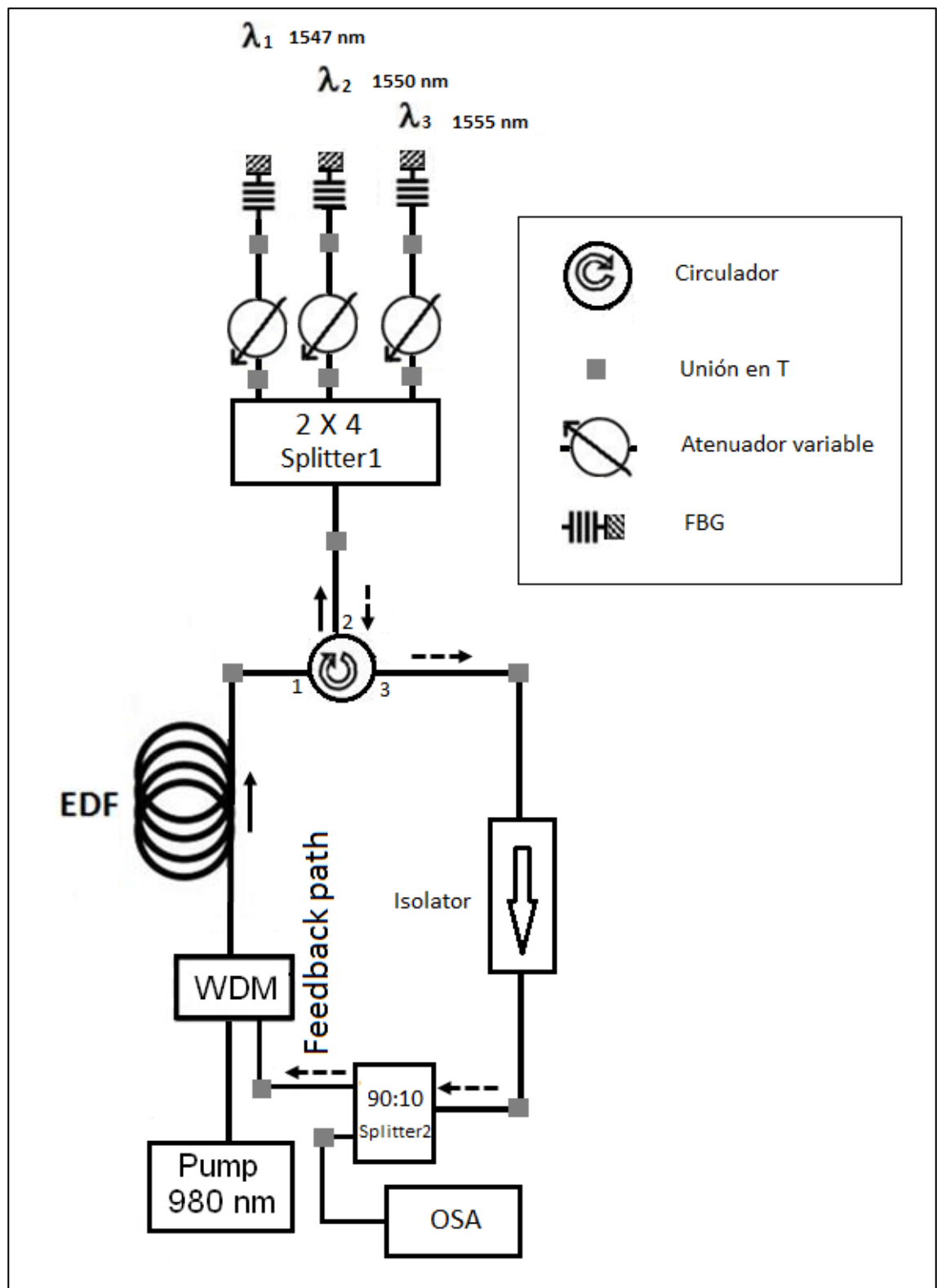


Figura 29: Esquema del circuito básico.

El sistema de partida emplea una fuente de bombeo a 980 nm, ésta se conecta al circuito mediante el WDM, a través de la pata de 980 nm. Entre el bombeo y el WDM es conveniente instalar un aislador para evitar que posibles reflexiones dañen el láser de

bombeo.

A continuación, la pata común del WDM, se conecta a la entrada del EDF (fibra dopada con Erbio) y la salida del EDF se conecta al puerto 1 del circulador. En el puerto 2 del circulador se encuentra conectado al splitter1 2x4 (sólo se da uso a un puerto de entrada y tres de salida) y a cada una de las tres salidas en uso se conecta un atenuador y un FBG con  $\lambda_B$  distinta (se emplean 1547 nm, 1550 nm y 1555 nm).

El puerto 3 del circulador se conecta a un aislador (con longitud de onda de trabajo de 1550 nm) y éste a la entrada del splitter2 (2x2/90:10). Finalmente el puerto 10% del splitter2 se conecta al OSA y el puerto 90% al WDM por la pata de 1550 nm.

### Consideraciones:

Como se ve en la [Figura 29](#), en la mayor parte de las conexiones entre elementos se han empleado uniones en T, sin embargo un circuito orientado a una duración más duradera se habrían soldado los elementos, reduciendo las pérdidas totales.

Respecto a la unión entre el bombeo y el WDM, se decidió soldar la unión entre ambos elementos para proteger el láser. De esta manera cualquier problema que pudiera surgir con las conexiones (Ej. quemaduras, reflexiones...) se eliminaría o en el peor caso el WDM evitaría que se propagase hasta el bombeo dañándolo. Dado que el WDM no es un componente activo su resistencia frente a estos problemas es mucho mayor. También se soldó el puerto común del WDM al EDF, de esta manera se logra reducir las pérdidas al máximo y transmitir la mayor cantidad de potencia al EDF, mejorando la respuesta final.

Como seguridad se instaló un aislador entre el circulador y el splitter2 para proteger el bombeo. El puerto 980 nm del WDM conectado al bombeo elimina cualquier señal que no se encuentre en 980 nm y el aislador, que solo deja pasar alrededor de 1550 nm, elimina cualquier rastro del bombeo que pueda permanecer.

En cuanto a la fibra de Erbio se utilizó el EDF i-25(980/125), fibra de alta absorción. En este trabajo se empleó una fibra dopada con Erbio de 2.5 m de longitud

### ***3.2.1.1. Funcionamiento y resultados***

Una vez descrito el circuito nos centraremos en su funcionamiento. El objetivo de este trabajo es el de obtener un láser multi-longitud de onda para mediciones de temperatura. El primer paso es el de obtener el láser multi-longitud de onda, para ello emplearemos un láser de fibra dopada con Erbio.

Mediante el bombeo y el EDF se obtiene emisión de luz en un rango centrado en 1550 nm (1520-1570 nm). A continuación se empleará un anillo para lograr la realimentación, el splitter2 se encarga de la recirculación de la luz, por el puerto 10% se obtiene la salida del láser y por el puerto 90% la realimentación.

El siguiente paso es la obtención de los picos del láser multi-longitud de onda, para ello emplearemos FBGs. La señal a la salida del EDF entra en el circulador por el puerto 1 y pasa al puerto 2, el splitter1 divide y reparte la señal entre las tres salidas en uso. A continuación la señal atraviesa el atenuador y entra en el FBG. Como ya se vio en el apartado 1.7.1 [Redes de difracción Bragg \(FBG\)](#), se refleja cerca del 99% de la señal situada en  $\lambda_B$ . Las reflexiones procedentes de los tres FBGs entran al circulador por el puerto 2 y salen por el puerto 3. Obteniendo así el láser multi-longitud de onda con longitudes de onda de trabajo:  $\lambda_{B1}=1547$  nm,  $\lambda_{B2}=1550$  nm y  $\lambda_{B3}=1555$  nm.

De cara al funcionamiento del sistema, el bombeo se alimenta con una intensidad de 400 mA a 25 °C en todo el trabajo (excepto los puntos que especifiquen otro valor de intensidad de bombeo). Llegados a este punto, la respuesta del sistema consiste en tres picos con diferentes niveles de potencia, el último paso consiste en ecualizar los tres canales. Para obtener un mismo nivel de potencia entre los distintos canales del láser emplearemos los atenuadores situados entre el splitter1 y los FBGs. Regulando manualmente cada atenuador repartiremos la potencia entre los FBGs de manera que a la salida presenten el mismo nivel (Figura 30).

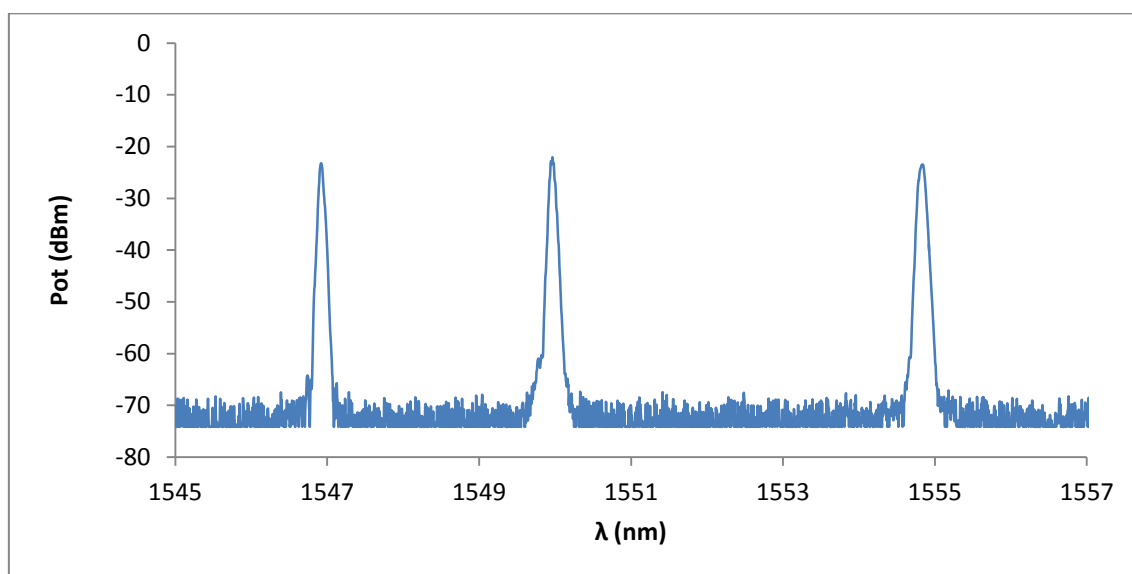


Figura 30: Láser multi-longitud de onda (1547, 1550 y 1555 nm).

A lo largo de todo el trabajo la ecualización se llevó a cabo de la siguiente manera: partiendo con los atenuadores variables al mínimo, manualmente se modificó la atenuación en

cada canal hasta que los valores de potencia de los tres canales, observados en el OSA, fuesen similares.

### **3.2.1.2. Conclusiones**

En vista de los resultados obtenidos (Figura 30), el circuito diseñado funciona como láser multi-longitud de onda (1547, 1550 y 1555 nm). Si bien es necesario ecualizar cada canal para lograr un nivel similar de potencia entre ellos, se consiguen altos niveles de señal, alrededor de -25 dBm en los tres canales y OSNR de 45 dB.

## **3.2.2. Anillo de estabilidad**

Una vez comprobado el funcionamiento del sistema como láser multi-longitud de onda y tras haber logrado ecualizar correctamente los tres canales, el siguiente punto se centra en la estabilidad del láser. La estabilidad es una característica fundamental en un láser. De poco sirve un láser cuya señal varía constantemente, las variaciones introducirían errores en la transmisión continuamente.

### **3.2.2.1. Propuesta**

El objetivo de este apartado es el de añadir, al circuito básico, un nuevo elemento cuyo objetivo es lograr mayor estabilidad en la respuesta del láser.

Una manera de mejorar la estabilidad del láser consiste en añadir un lazo realimentado en la cavidad del láser (Figura 31) [12]. El lazo consta de un splitter 70:30 y un carrete de fibra óptica SMF, cuya longitud se irá variando para estudiar su comportamiento y lograr la configuración óptima.

El lazo se añade entre el EDF y el circulador. A la salida del EDF se conecta el puerto 1 de entrada del splitter y el puerto 70 % se conectará al circulador, de esta manera aseguramos que la mayor parte de la señal no sufra atenuación extra y así el láser no perderá excesiva potencia. El puerto 30 % del splitter se conectará a un extremo del carrete de fibra SMF y el puerto 2 de entrada al otro extremo, logrando la recirculación de la luz. El objetivo de este diseño es crear una especie de cavidad donde la recirculación de la luz mejora la estabilidad resultante. El resto del circuito básico permanece inalterado.

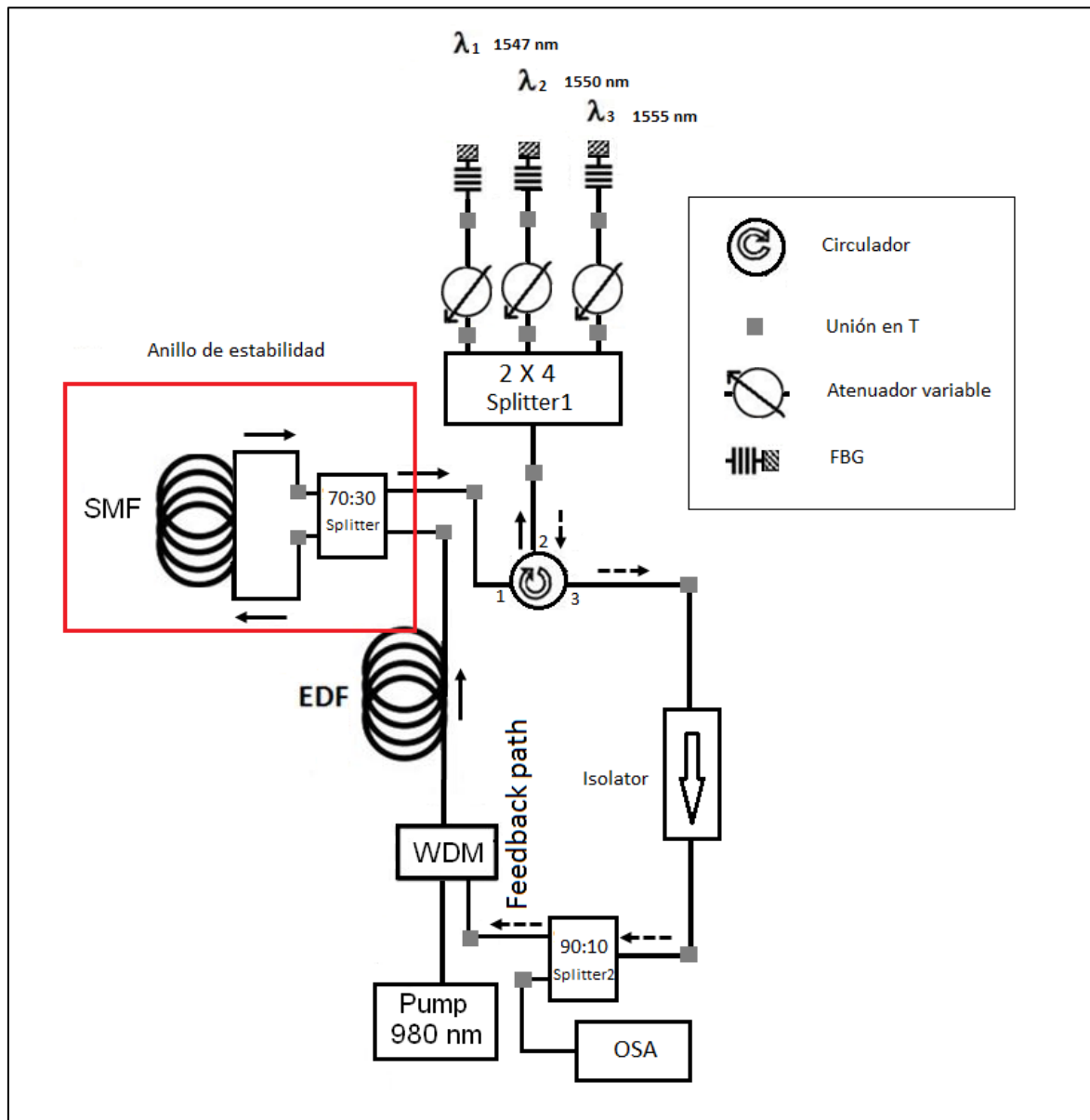
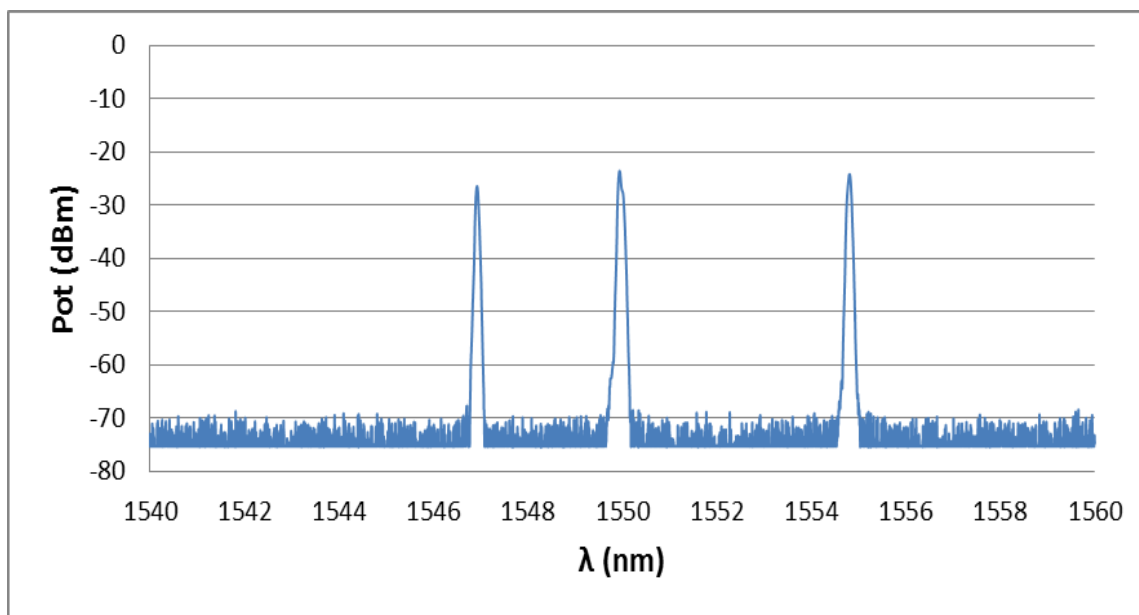


Figura 31: Esquema del circuito básico con el anillo de estabilidad.

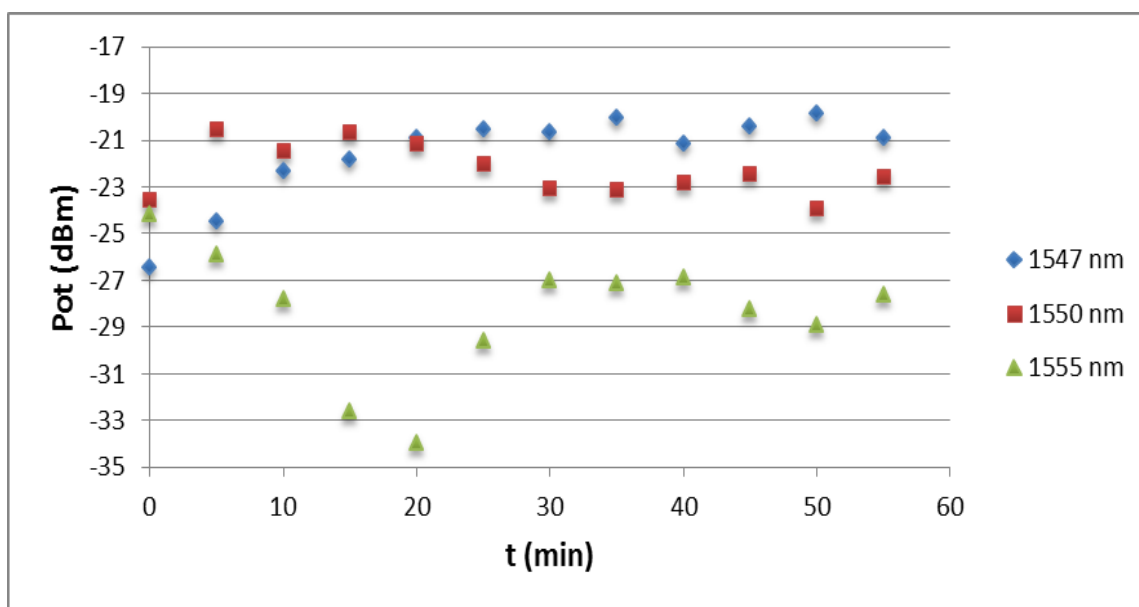
### 3.2.2.2. Resultados

A continuación muestran los resultados obtenidos al aplicar los distintos anillos de estabilidad.

Sin anillo de estabilidad:



a)



b)

Figura 32: a) Respuesta del láser. b) Estabilidad.

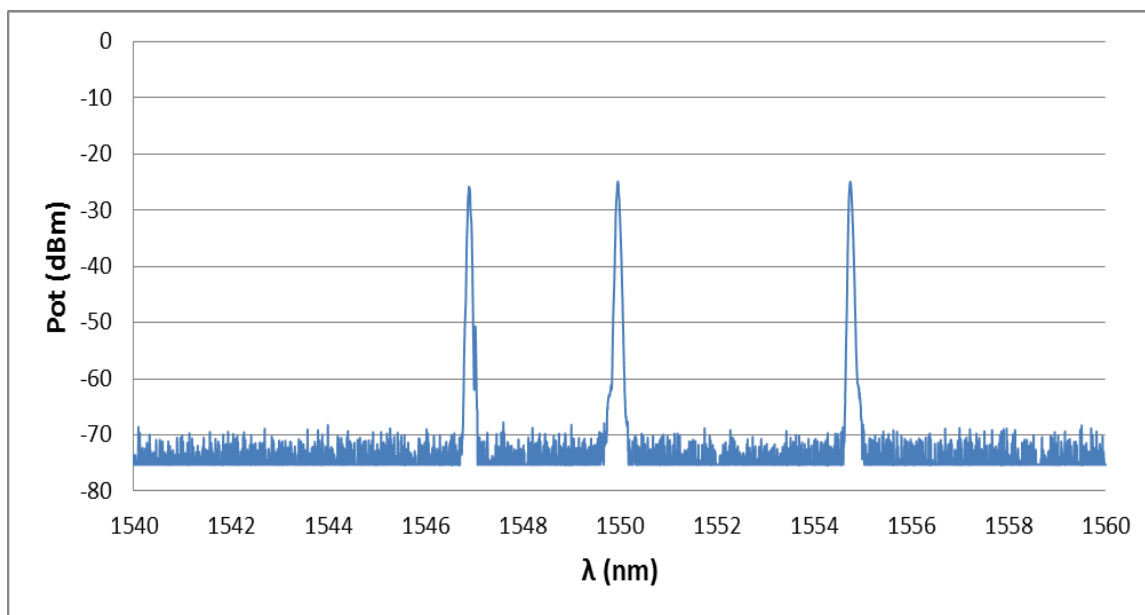
	Potencia media (dBm)	Variación máxima*(dB)
1547 nm	-21.30	6.56
1550 nm	-22.14	3.42
1555 nm	-27.65	9.78

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

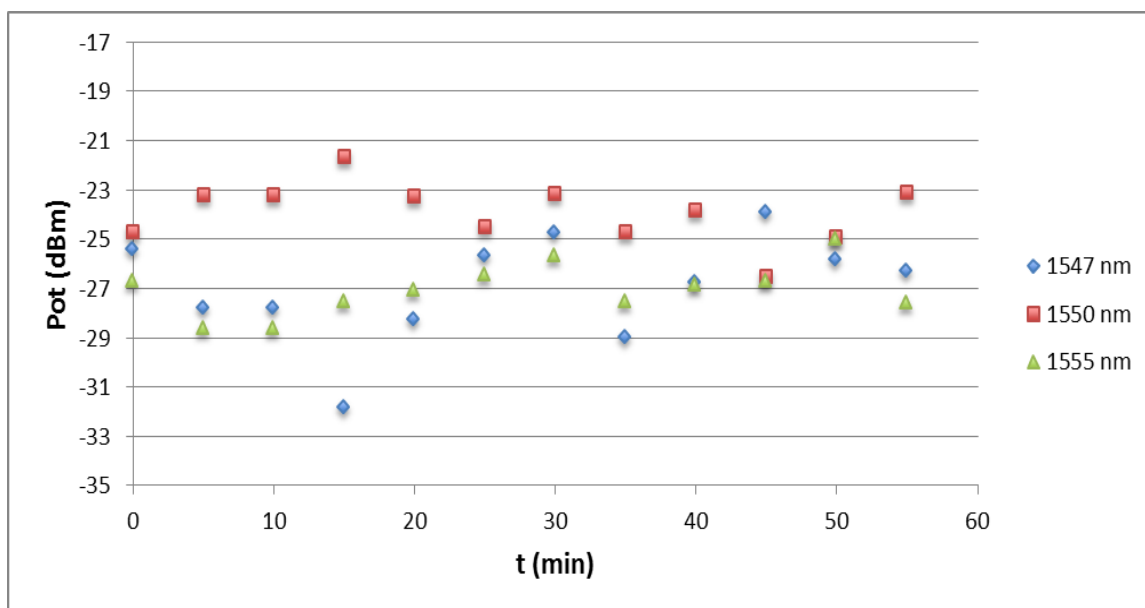
Tabla 1: Potencia media y variación máxima de cada canal.



Anillo de estabilidad con carrete SMF de 1 Km:



a)



b)

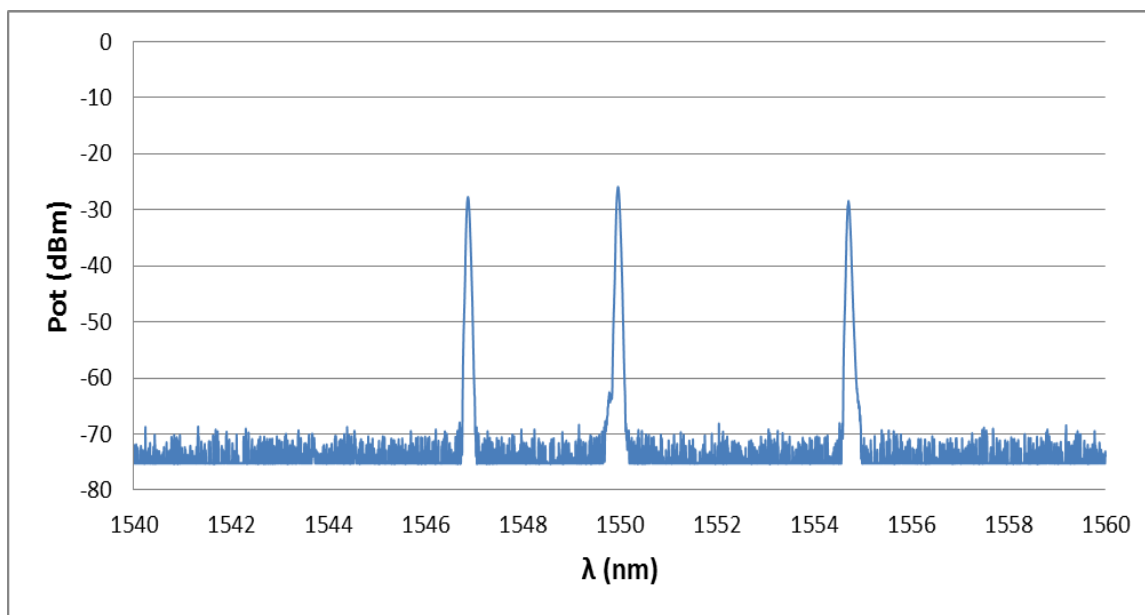
Figura 33: a) Respuesta del láser. b) Estabilidad.

	Potencia media (dBm)	Variación máxima* (dB)
1547 nm	-26.49	7.92
1550 nm	-23.76	4.85
1555 nm	-26.89	3.58

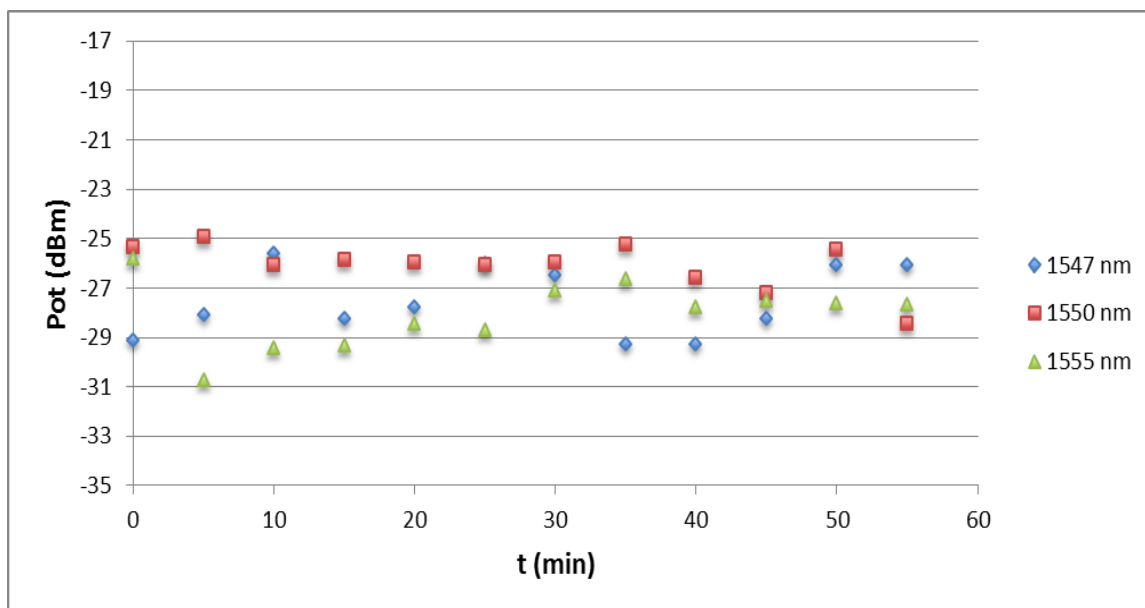
\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

Tabla 2: Potencia media y variación máxima de cada canal.

Anillo de estabilidad con carrete SMF de 2,5 Km:



a)



b)

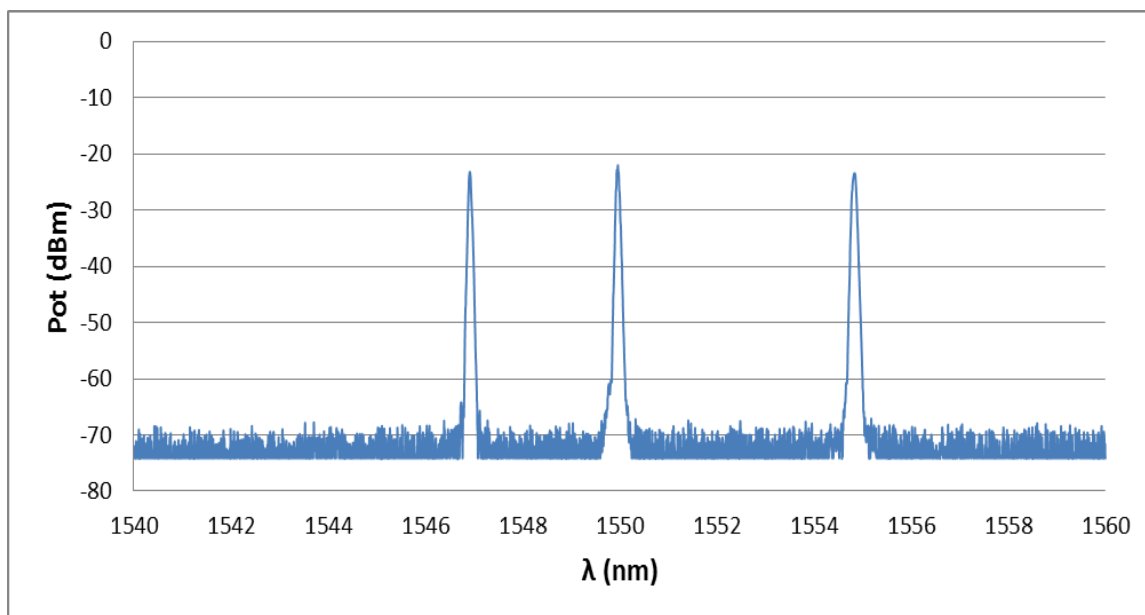
Figura 34: a) Respuesta del láser. b) Estabilidad.

	Potencia media (dBm)	Variación máxima* (dB)
1547 nm	-27.31	3.70
1550 nm	-26.00	3.51
1555 nm	-27.88	4.89

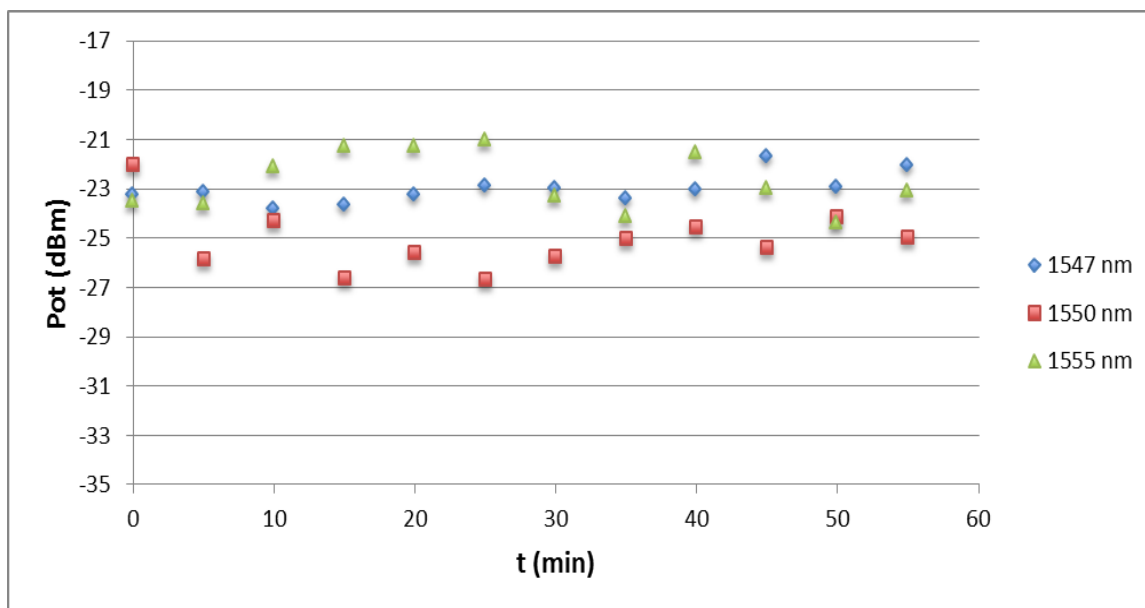
\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

Tabla 3: Potencia media y variación máxima de cada canal.

Anillo de estabilidad con carrete SMF de 5 Km:



a)



b)

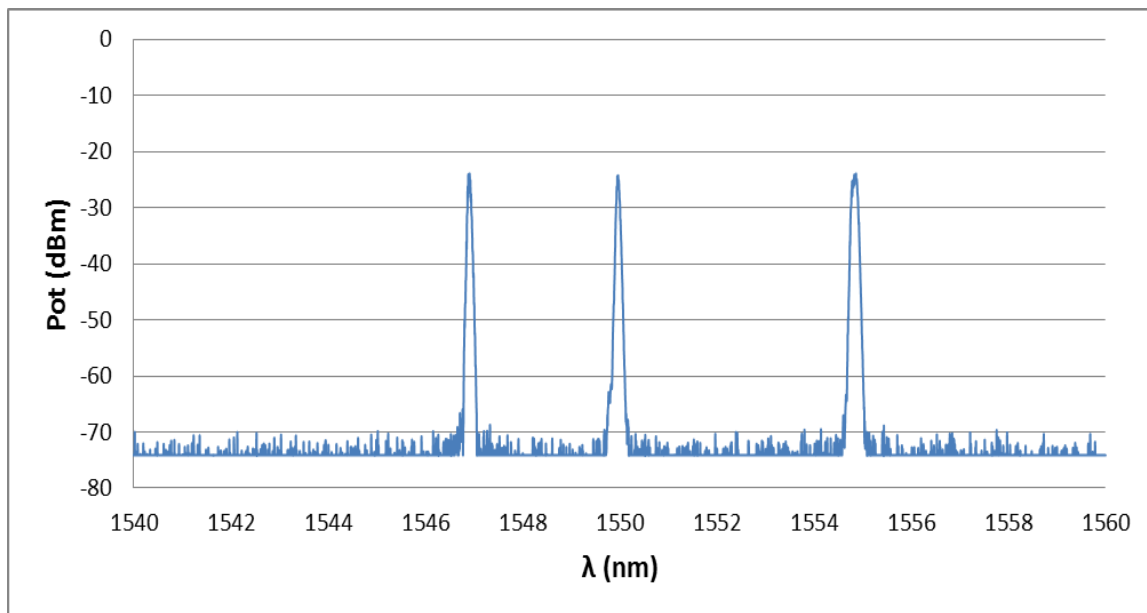
Figura 35: a) Respuesta del láser. b) Estabilidad.

	Potencia media (dBm)	Variación máxima *(dB)
1547 nm	-22.95	2.14
1550 nm	-24.91	4.62
1555 nm	-22.50	3.37

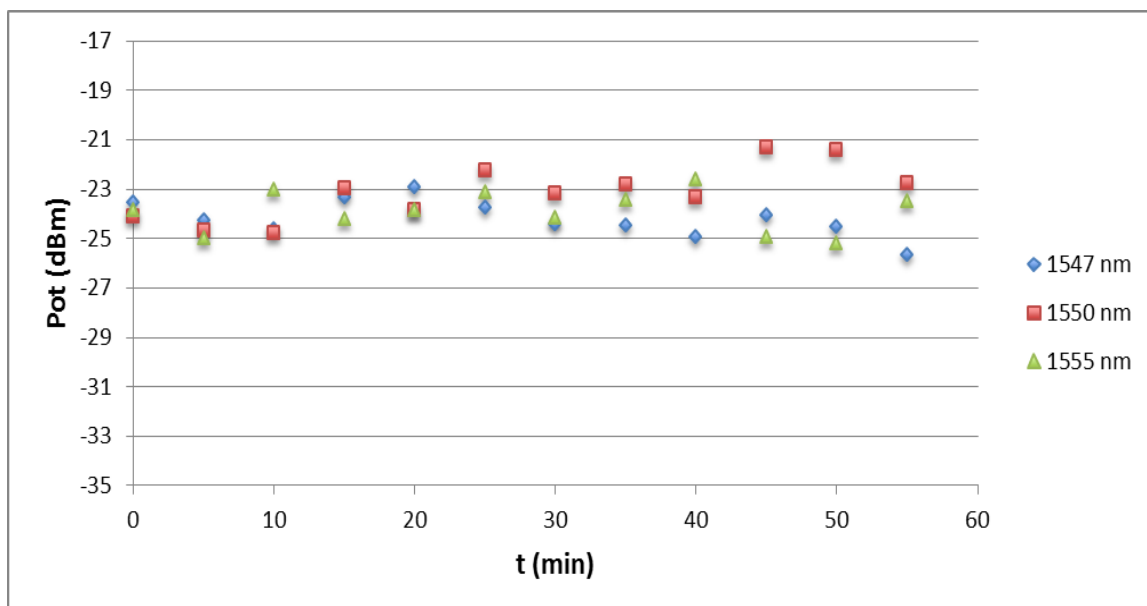
\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

Tabla 4: Potencia media y variación máxima de cada canal.

Anillo de estabilidad con carrete SMF de 10 Km:



a)



b)

Figura 36: a) Respuesta del láser. b) Estabilidad.

	Potencia media (dBm)	Variación máxima* (dB)
1547 nm	-24.20	2.73
1550 nm	-22.98	3.44
1555 nm	-23.88	2.59

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

Tabla 5: Potencia media y variación máxima de cada canal.

A continuación se discutirán los resultados obtenidos tras medir, a lo largo de una hora en intervalos de 5 minutos, la respuesta del láser.

Lo niveles de potencia y OSNR obtenidos son elevados en todas las configuraciones. En el peor caso, la configuración con anillo de 2.5 km, el nivel de potencia medio de los tres canales se encuentra en torno a los -27 dBm con un valor OSNR de 43 dB. El motivo de por el cual la configuración con anillo de 2.5 Km obtiene notablemente menor nivel de potencia que el resto se debe al uso de dos carretes de fibra SMF (1+1.5 Km). La unión de ambos carretes es mediante una T, que introduce pérdidas adicionales.

En el resto de configuraciones la potencia se mantiene alrededor de los -24 dBm con un nivel OSNR aproximado de 46 dB. Las diferencias de potencia entre las distintas configuraciones se deben principalmente al proceso de ecualización.

### Estabilidad

En cuanto a la estabilidad se aprecia una clara mejora al aumentar la longitud del carrete de fibra del anillo. Para el caso sin anillo, la variación máxima para 1547, 1550 y 1555 nm es de 6.56 dB, 3.42 dB y 9.78 dB respectivamente. La variación del nivel de señal en 1547 y 1555 nm es muy alta lo que indica poca estabilidad. Cuanto menor sea el rango en el que cambia la señal más estable será.

Para el anillo de 1 Km se obtuvieron variaciones máximas de 7.92 dB en 1547 nm, 4.85 dB en 1550 nm y 3.58 dB en 1555 nm. Se aprecia una mejora en general, la variación en 1547 nm es muy alta pero para los dos canales restantes la variación no es excesivamente alta.

El siguiente caso, el anillo de 2.5 Km se obtuvieron variaciones máximas de 3.7 dB en 1547 nm, 3.51 dB en 1550 nm y 4.89 dB en 1555 nm. En este punto ya se nota una clara mejora de la estabilidad del sistema. La variación máxima es inferior a los 5 dB en los tres canales.

En la configuración en anillo con el carrete de 5 Km, las variaciones máximas obtenidas son de 2.14 dB, 4.62 dB y 3.37 dB para 1547, 1550 y 1555 nm respectivamente. Resultados con poca variación máxima, especialmente el canal de 1547 nm que logra bajar de los 3 dB.

Finalmente el último caso, el anillo con carrete de 10 Km presenta variaciones máximas de 2.73 dB en 1547 nm, 3.44 dB en 1550 nm y 2.59 en 1555 nm. Esta configuración es la más estable, los canales 1547 y 1555 nm muestran una variación máxima por debajo de los 3 dB. Respecto al canal de 1550 nm, este presenta una variación máxima inferior a 4 dB.

## Tiempo de estabilización del sistema

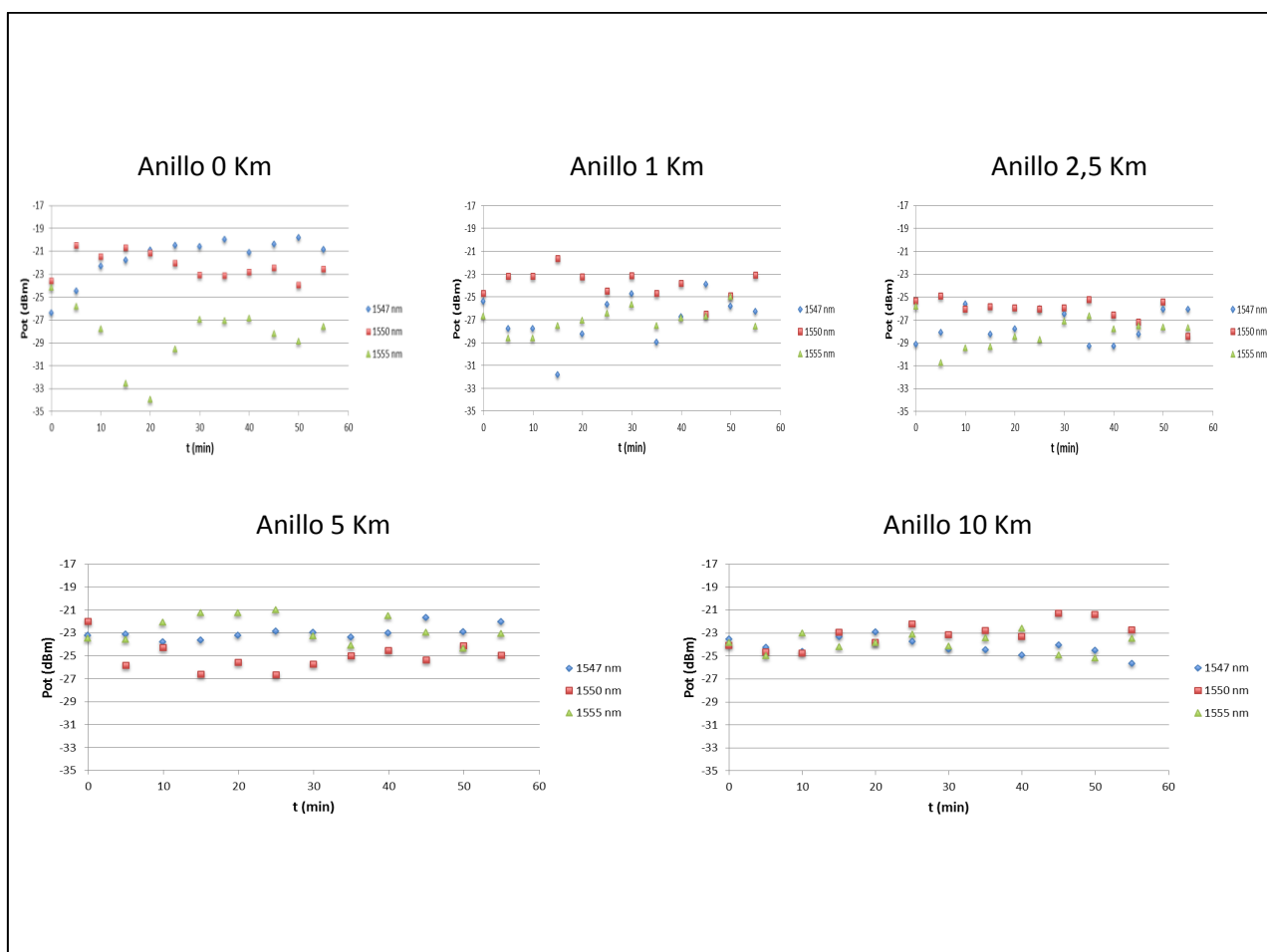


Figura 37: Estabilidad para las distintas longitudes del carrete.

En las gráficas de estabilidad obtenidas (Figura 37) se puede observar un fenómeno, especialmente claro para los casos de anillos de 0, 1 y 2.5 Km. Si comparamos los primeros 30 min con los últimos 30 min de las gráficas, se ve una clara mejora en la estabilidad una vez transcurridos los primeros 30 min.

### Configuración sin anillo:

	Variación máxima* (dB) durante los 60 min	Variación máxima* (dB) durante los últimos 30 min
1547 nm	6.56	1.27
1550 nm	3.42	1.48
1555 nm	9.78	2.03

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

Tabla 6: Configuración sin anillo. Variación máxima (dB) durante 60 min y los últimos 30 min.

Configuración con anillo de 1 Km:

	Variación máxima* (dB) durante los 60 min	Variación máxima* (dB) durante los últimos 30 min
1547 nm	7.92	5.07
1550 nm	4.85	3.40
1555 nm	3.58	2.58

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

**Tabla 7: Configuración con anillo de 1 Km. Variación máxima (dB) durante 60 min y los últimos 30 min.**

Configuración con anillo de 2.5 Km:

	Variación máxima* (dB) durante los 60 min	Variación máxima* (dB) durante los últimos 30 min
1547 nm	3.7	3.25
1550 nm	3.51	3.20
1555 nm	4.89	1.06

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

**Tabla 8: Configuración con anillo de 2.5 Km. Variación máxima (dB) durante 60 min y los últimos 30 min.**

Configuración con anillo de 5 Km:

	Variación máxima* (dB) durante los 60 min	Variación máxima* (dB) durante los últimos 30 min
1547 nm	2.14	1.69
1550 nm	4.62	1.63
1555 nm	3.37	2.86

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

**Tabla 9: Configuración con anillo de 5 Km. Variación máxima (dB) durante 60 min y los últimos 30 min.**

Configuración con anillo de 10 Km:

	Variación máxima* (dB) durante los 60 min	Variación máxima* (dB) durante los últimos 30 min
1547 nm	2.73	1.61
1550 nm	3.44	2.03
1555 nm	2.59	2.59

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

**Tabla 10: Configuración con anillo de 10 Km. Variación máxima (dB) durante 60 min y los últimos 30 min.**

De las tablas anteriores se pueden deducir que se obtuvo ganancia en estabilidad tras

los primeros 30 min, este efecto es especialmente notable en las primeras tres configuraciones (0, 1 y 2.5 Km). Este efecto se debe a la necesidad, por parte del sistema, de un tiempo para estabilizarse.

### Ecualización

Otro aspecto importante, ligeramente relacionado con la estabilidad, es la ecualización de los canales. Partiendo de tres canales correctamente ecualizados, un sistema estable los mantendrá ecualizados a lo largo del tiempo. Sin embargo un sistema inestable introducirá tantas variaciones en los canales que se producirán grandes diferencias entre sí. Si a un sistema inestable introducimos canales mal ecualizados (grandes diferencias de potencia entre los distintos canales), como es el caso sin anillo de estabilidad, como resultado obtenemos desigualdades aún mayores.

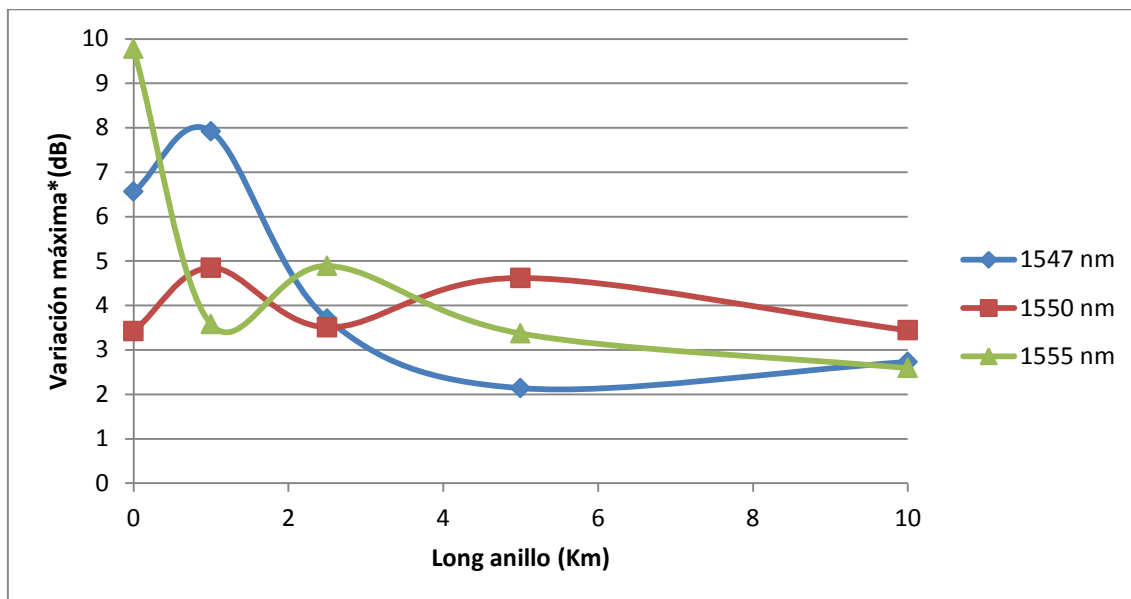
Para el sistema sin anillo las potencias medias son de -21.4 dBm en 1547 nm, -22.14 dBm en 1550 nm y -27.65 dBm en 1555 nm. La diferencia entre los canales de 1547 y 1550 nm respecto al de 1555 nm es de 5-6 dB. Mientras que para el resto de configuraciones las diferencias son de entre 1 y 2 dB. Como resultado se observan niveles muy distintos de potencia para cada canal en el caso sin anillo, mientras que en el resto los niveles son muy similares.

También es importante remarcar el efecto antes señalado que se produce a los 20-30 min, especialmente en la configuración en anillo de 1 y 2.5 km. En estos dos casos la ecualización mejora notablemente pasado un tiempo desde el inicio.

### **3.2.2.3. Conclusiones**

Como se ve a continuación en la Figura 38, al emplear un anillo de mayor longitud, que implica mayor recirculación, la estabilidad mejora notablemente. Partiendo de la primera y segunda configuración, se obtuvieron variaciones máximas por encima de los 5 dB. Para el caso de 2.5 km no se superan los 5 dB pero tampoco se logra bajar de los 3 dB. Por último para los dos últimos casos, 5 y 10 km, se consiguieron variaciones máximas por debajo de los 3 dB y en ningún momento superior a 5 dB.





\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

**Figura 38: Mejora de la variación máxima con la longitud del anillo.**

Respecto al tiempo de estabilización del sistema es importante señalar que debido a las pocas muestras tomadas en los últimos 30 min (6 muestras) solo podemos concluir que ciertamente la estabilidad mejora tras un tiempo de estabilización por parte del sistema, pero esta mejora seguramente no es tan drástica como pueda parecer en las tablas (Tabla 6-10).

En vista de los resultados obtenidos, a partir de los 2.5 km en el anillo, la estabilidad mejora considerablemente en los tres canales. La configuración con anillo de 2.5 km obtiene el menor nivel de potencia de salida, por este motivo y de cara al sistema remoto se descarta esta configuración. Entre los anillos de 5 y 10 km, este último obtiene mejores niveles de estabilidad, sin embargo el anillo de 5 km introduce menos atenuación. Finalmente se escogió la configuración en anillo de 5 km como la óptima para el resto del trabajo, la estabilidad obtenida es suficientemente buena y se logrará obtener más potencia de salida, factor fundamental en la configuración remota.

### 3.2.3. Otras configuraciones del splitter de salida

#### 3.2.3.1. Propuesta

Una vez escogida la longitud óptica de la fibra del anillo de estabilidad (5 Km), el siguiente punto crítico del diseño es el splitter2 (el splitter de salida). La relación de acoplo del splitter de salida es fundamental para el sistema, mayor potencia de salida supone menos recirculación. Existe un compromiso entre la potencia de salida y la recirculación [13], el objetivo de este apartado consiste en alcanzar la relación óptima entre la recirculación y la potencia de salida mediante distintas relaciones de acoplo en el splitter2.

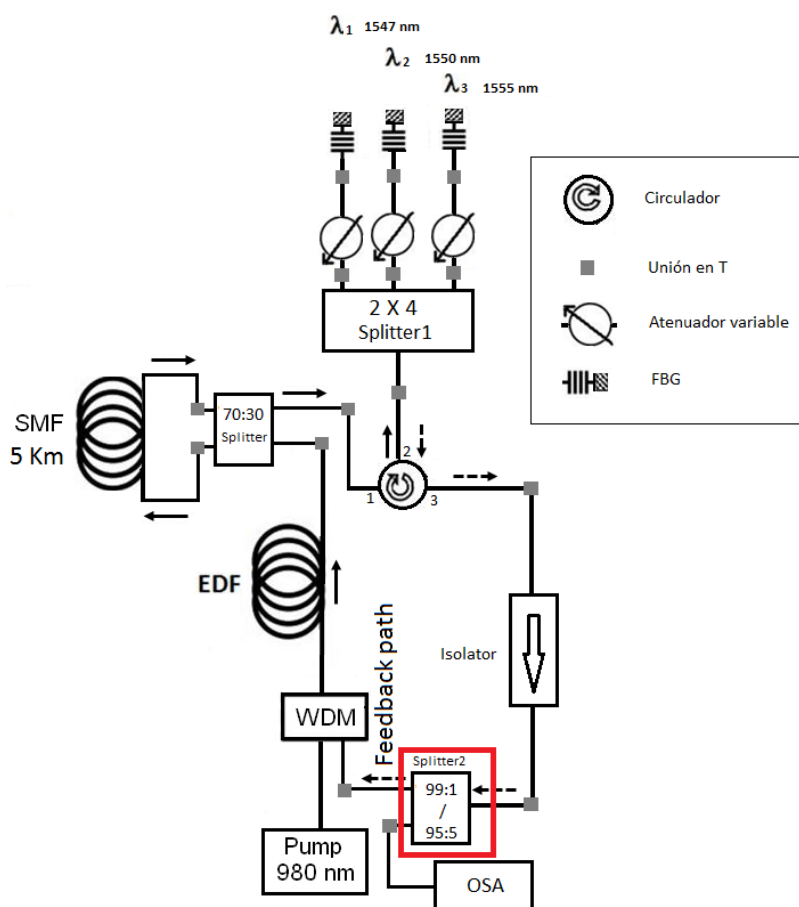


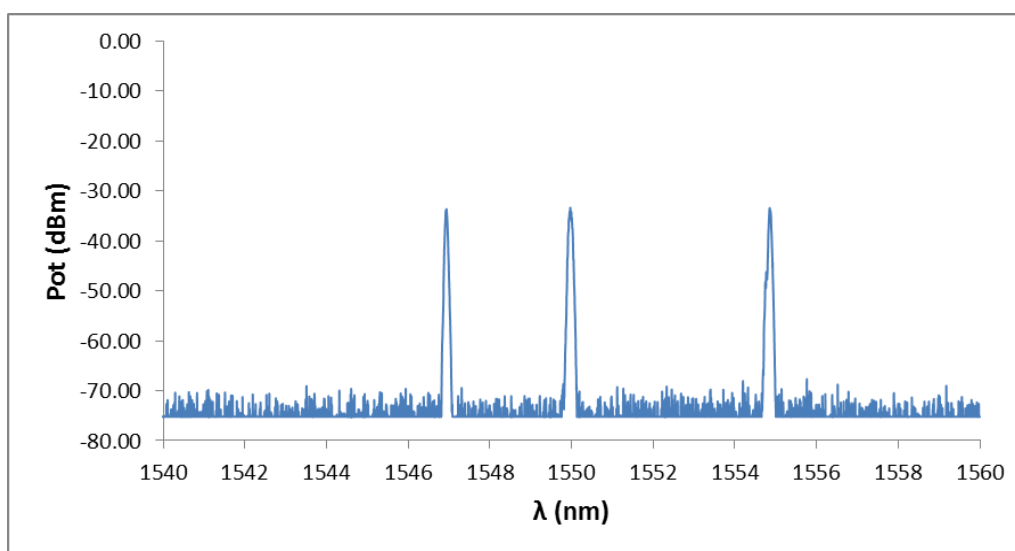
Figura 39: Cambio propuesto al circuito.

Empleando el splitter 90:10 se alcanzaron niveles de señal altos, alrededor de los -23 dBm, con un nivel OSNR de 47 dB. Como el nivel de señal logrado es muy bueno, no es necesario emplear splitters con salida superior al 10 % para mejorar el nivel de señal. Por este

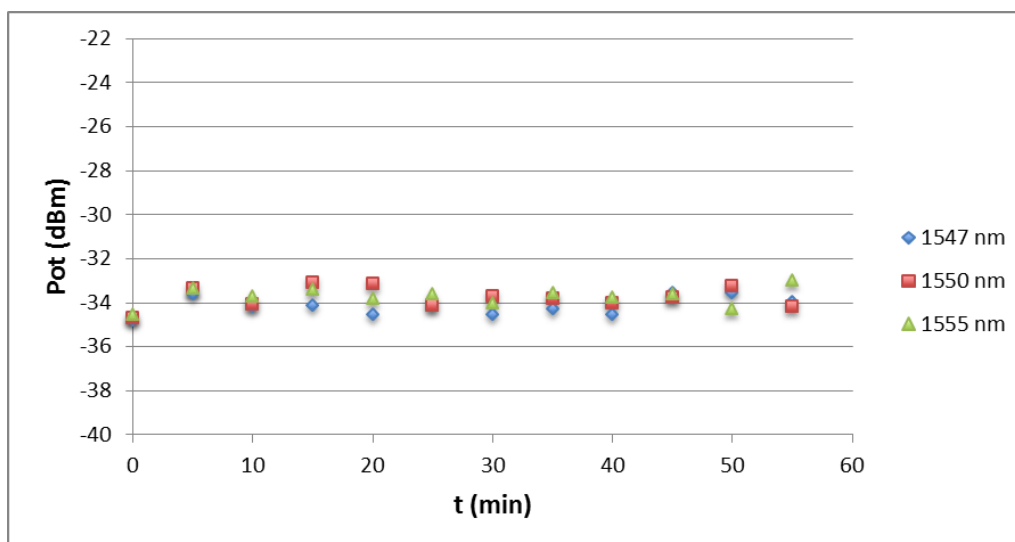
motivo se probarán las relaciones de splitter de 95:5 y 99:1 para tratar de mejorar la realimentación y con ello la estabilidad del sistema.

### 3.2.3.2. Splitter 99:1

Partiendo del circuito de la Figura 40 y empleando el splitter 99:1 se obtuvieron los siguientes resultados:



a)



b)

Figura 40: a) Respuesta del láser con splitter 99:1. b) Estabilidad

	Potencia media (dBm)	Variación máxima* (dB)
1547 nm	-34.17	1.26
1550 nm	-33.74	1.62
1555 nm	-33.76	1.55

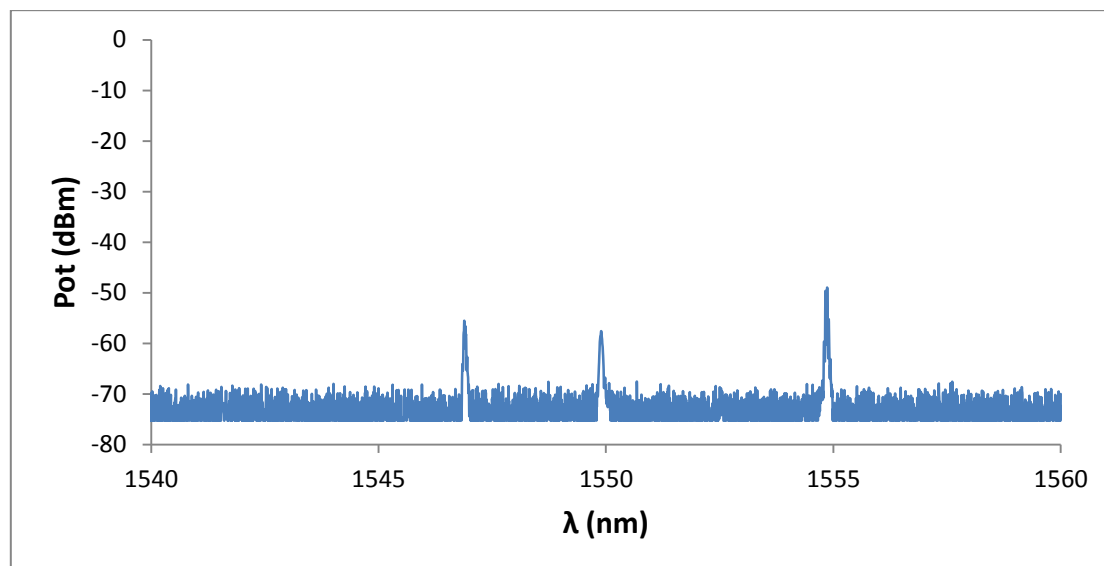
\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

**Tabla 11: Potencia media y variación máxima de cada canal.**

El nivel de potencia obtenido es de -34 dBm aproximadamente. Con el splitter 90:10 obteníamos -25 dBm de potencia media en el peor canal. Como era de esperar el nivel de señal resultante es más bajo, unos 10 dB menos.

El objetivo de este cambio es el de comprobar si mejora la estabilidad del láser al mejorar la relación de potencia de la realimentación. Como se ve en la imagen b) de la Figura 40, la estabilidad mejora considerablemente y la ecualización de los canales es muy buena también. Observando los datos de la tabla anterior (Tabla 11), la variación máxima es inferior a 2 dB en los tres canales.

El uso del splitter 99:1 mejoró considerablemente la estabilidad del sistema, sin embargo el nivel de potencia obtenido es menor en comparación con el obtenido empleando el splitter 90:10. El bajo nivel de señal obtenido podría suponer un problema en la implementación del sistema remoto, por este motivo a continuación se midió la respuesta del sistema remoto<sup>1</sup>:



**Figura 41: Sistema remoto con splitter 99:1.**

<sup>1</sup> Sistema remoto a 25 Km, su configuración se discutirá más adelante en el punto 3.3.2 Desarrollo del sistema remoto.

La respuesta obtenida (Figura 41) muestra un nivel de potencia muy bajo, inferior a -50 dBm en el mejor caso. La SNR es de 10 dB en el peor caso, el canal de 1550 nm. El nivel de potencia no era muy estable y los canales se enmascaraban con el ruido momentáneamente.

Con estos resultados, el splitter 99:1 no es válido para la implementación del sistema remoto a 25 Km. Sin embargo si sería óptimo para un sistema más cercano, donde sus pérdidas en potencia sean asumibles, mejorando la estabilidad del láser.

### ***3.2.3.3. Splitter 95:5***

Al emplear el splitter 99:1 la estabilidad mejora pero el nivel de señal obtenido para el sistema remoto a 25 Km no es suficiente. Tras comprobar que el splitter 99:1 no funcionaría en el sistema remoto, se estudió la viabilidad del uso de un splitter 95:5. Como ya se comprobó en el apartado anterior, [2.2.3.2 Splitter 99:1](#), al aumentar el nivel de potencia que recircula la estabilidad mejora, sin embargo el problema se encuentra en el nivel de potencia de salida. A continuación se comprobará si un 5 % de potencia de salida es suficiente en el sistema remoto o si pasará lo mismo que con el splitter 99:1.

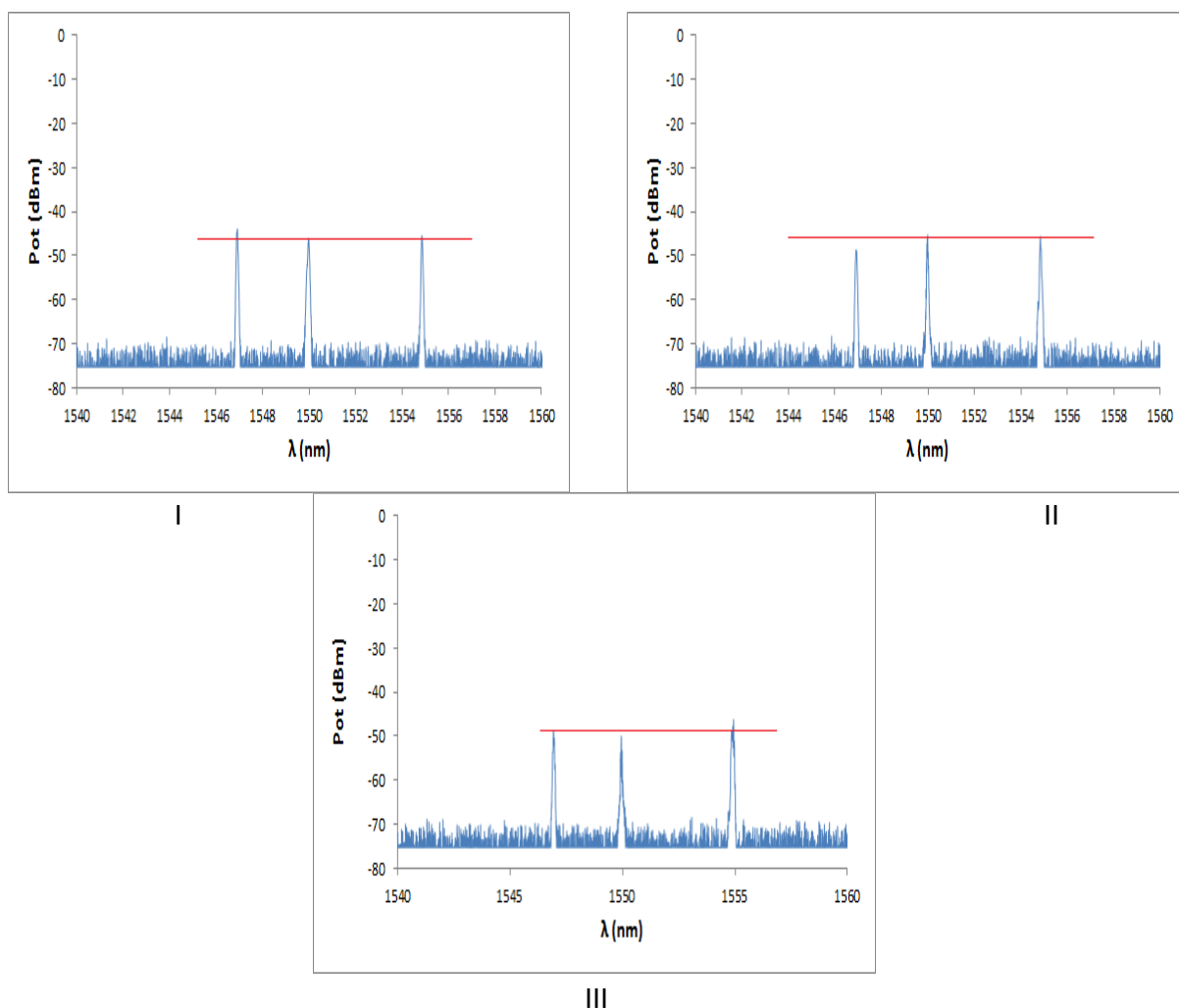


Figura 42: Respuesta del sistema remoto con el splitter 95:5 en tres instantes de tiempo.

El sistema remoto a 25 km empleando el splitter 95:5 obtuvo niveles de potencia en torno a los -45 dBm, 5 dB mayor que el mejor canal (1555 nm) del sistema remoto con splitter 99:1. Sin embargo surgieron otros problemas, no era posible ecualizar correctamente el sistema. La Figura 42 muestra la respuesta obtenida en tres instantes de tiempo distintos sin alterar ningún parámetro del circuito (atenuadores, nivel de potencia...). Continuamente un canal (distinto cada vez) variaba respecto a los otros.

Además, ocasionalmente y durante unos pocos segundos, uno de los canales se perdía entre el ruido (Figura 43).

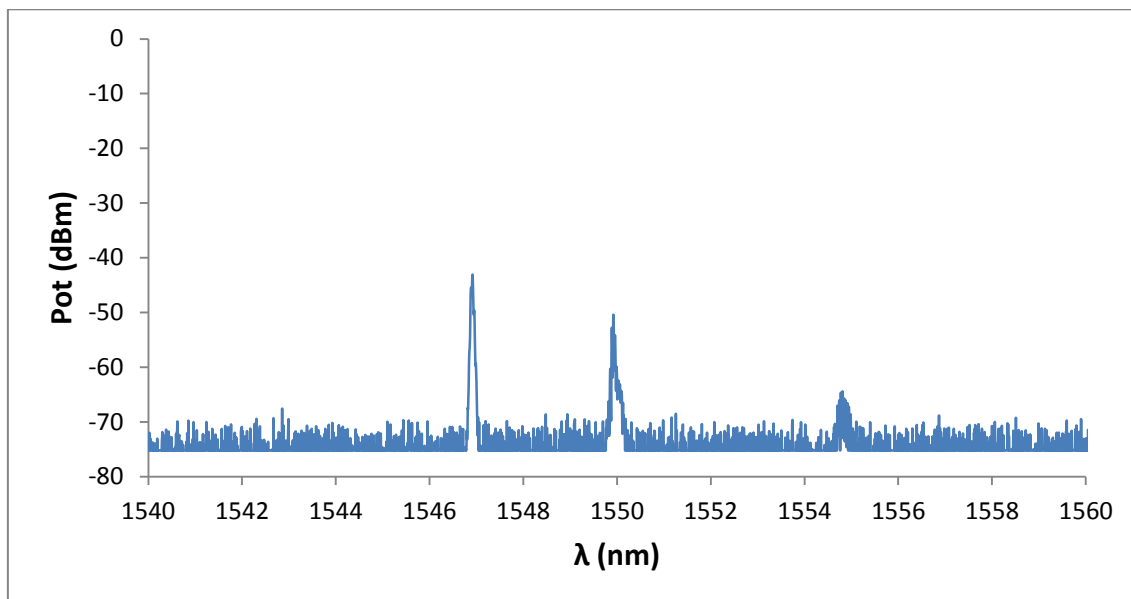


Figura 43: Enmascaramiento momentáneo de un canal entre el ruido.

Los problemas para ecualizar y especialmente la pérdida ocasional de uno de los canales fueron las razones por las que no se prosiguió con el estudio del comportamiento del sistema con el splitter 95:5.

#### 3.2.3.4. Conclusiones

Efectivamente la estabilidad del láser mejoró al aumentar la relación de potencia destinada a la realimentación, con el splitter 99:1 la variación máxima en los tres canales resultó ser inferior a 2 dB en sistema no remoto. Sin embargo, la poca potencia obtenida supuso un problema para el sistema remoto a 25 km, por su bajo nivel para el splitter 99:1 y por la inestabilidad obtenida para el splitter 95:5.

Debido a estos problemas, se decidió mantener el splitter 90:10 como configuración óptima.

### 3.2.4. Sensor de temperatura

#### 3.2.4.1. Propuesta

Una vez estudiadas las posibles variaciones planteadas en el circuito y tras analizar los resultados, finalmente se alcanza el diseño óptimo (Figura 44).

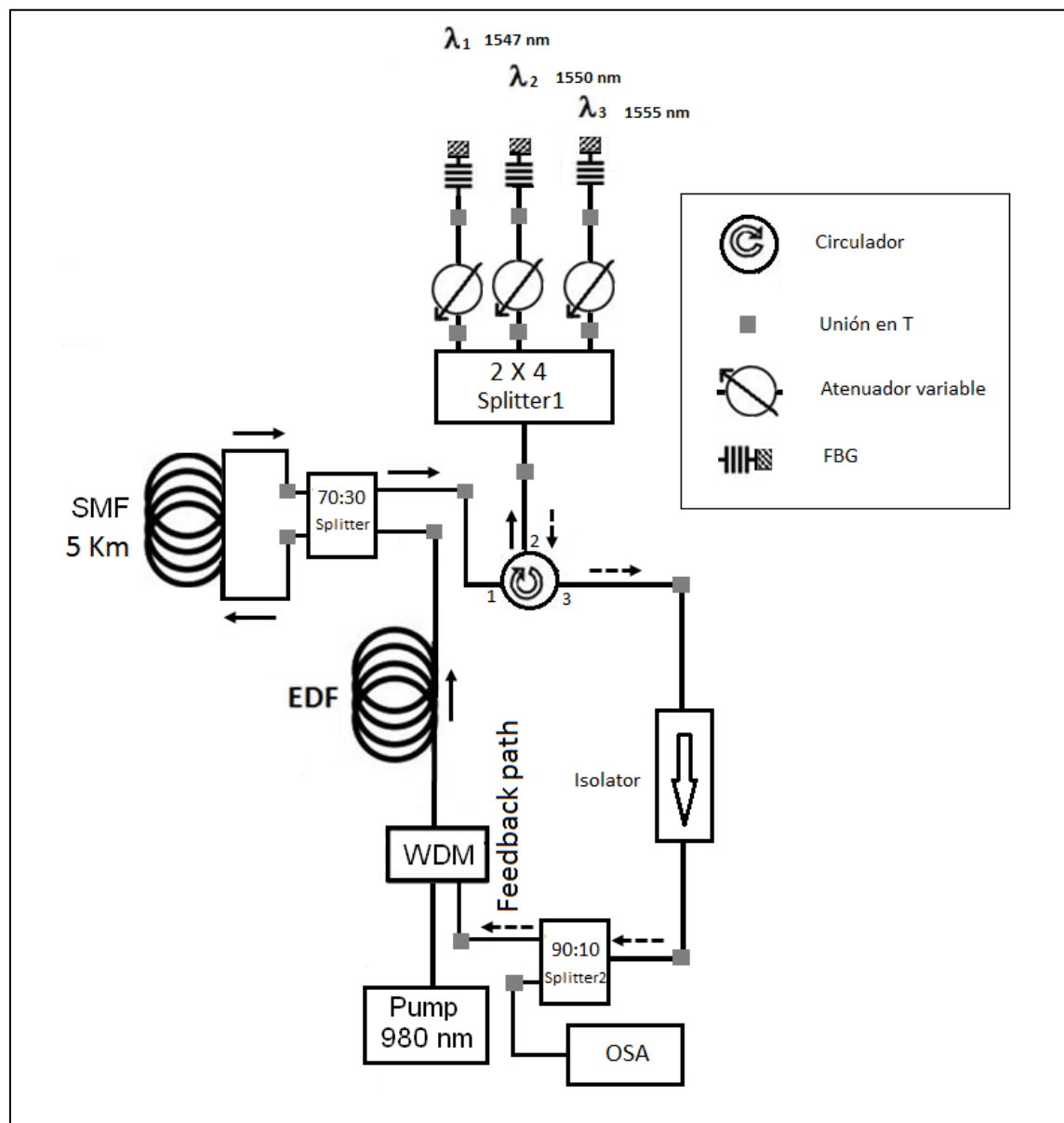


Figura 44: Diseño óptimo.



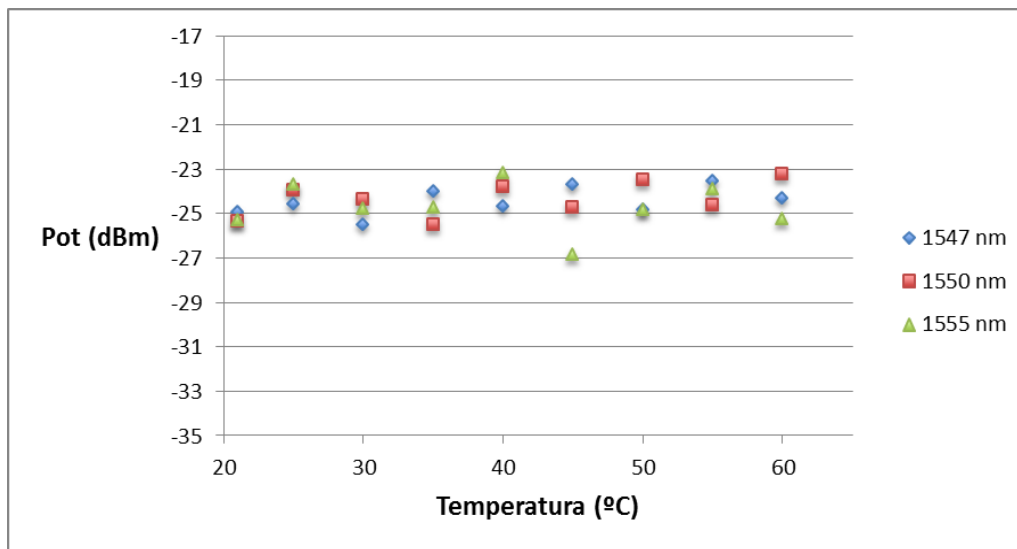
En las conclusiones del apartado [2.2.2 Anillo de estabilidad](#), se decidió el uso de fibra SMF de longitud 5 km en el anillo de estabilidad como configuración óptima. Las razones tras esta decisión son: su mayor estabilidad frente al resto de configuraciones (salvo la de 10 km) y sus menores pérdidas en comparación con el anillo de 10 km.

Respecto al splitter2, los splitters 99:1 y 95:5 no alcanzaban niveles de potencia de salida suficientemente altos para el sistema remoto. Por este motivo, junto al ocasional enmascaramiento de los canales debido a la baja OSNR, se decidió mantener el splitter 90:10, cuyos resultados en potencia y estabilidad son lo suficientemente buenos.

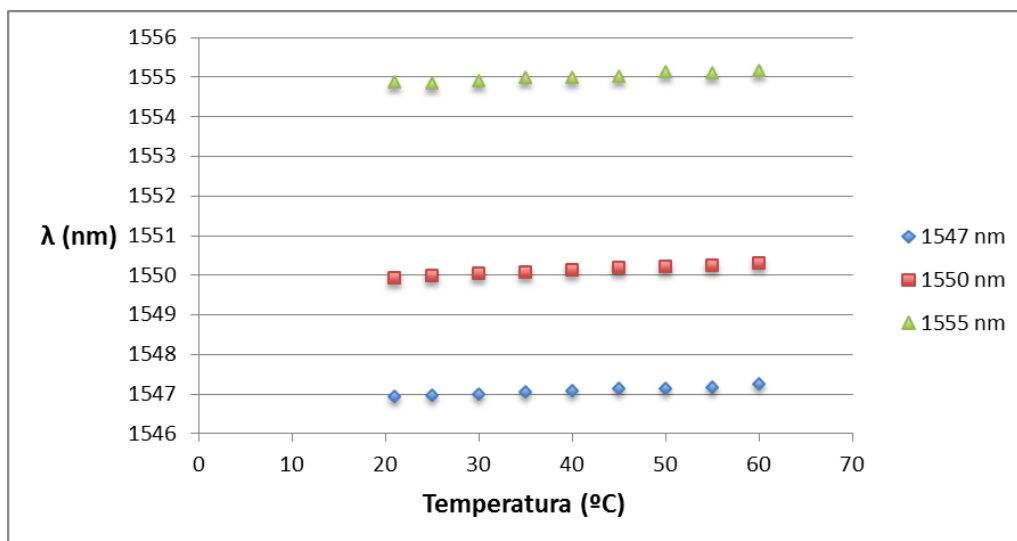
Una vez completado el diseño óptimo, el siguiente paso es el estudio de su comportamiento como sensor de temperatura. Para ello se emplean los FBGs como elemento de sensado, cambios de temperatura en el FBG se traducen en variación de su  $\lambda_B$  (longitud de onda de Bragg). Monitorizando la variación y posición de  $\lambda_B$  se obtiene la temperatura, siguiendo una relación aproximadamente lineal.

En la realización de este estudio se empleó una cámara climática, configurada de 20-60 °C. Cada 5 °C se capturó en el OSA la señal de salida.

### 3.2.4.2. Resultados



a)



b)

Figura 45: a) Estabilidad del sistema. b) Variación de  $\lambda$  respecto a  $T$  (°C).

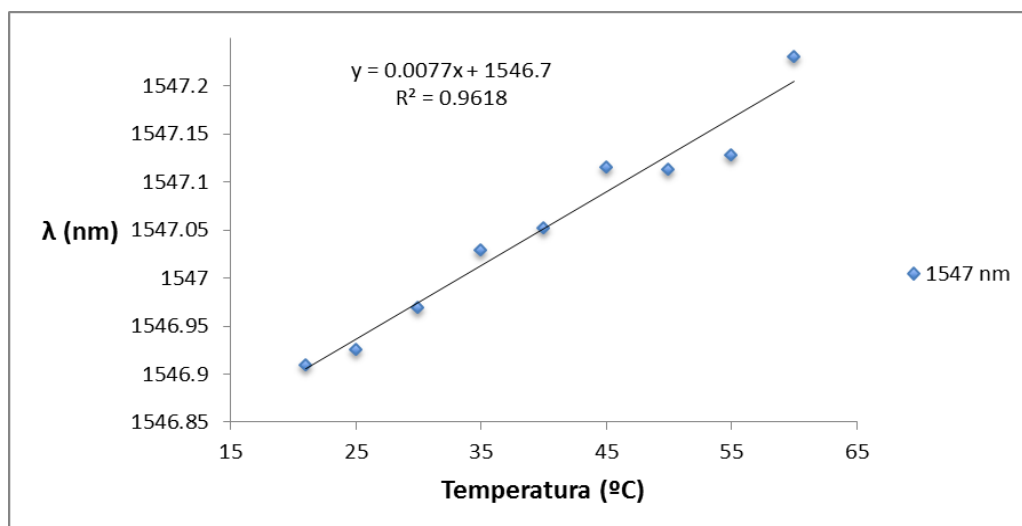
	Potencia media (dBm)	Variación máxima* (dB)
1547 nm	-24.41	2.01
1550 nm	-24.27	2.26
1555 nm	-24.60	3.71

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

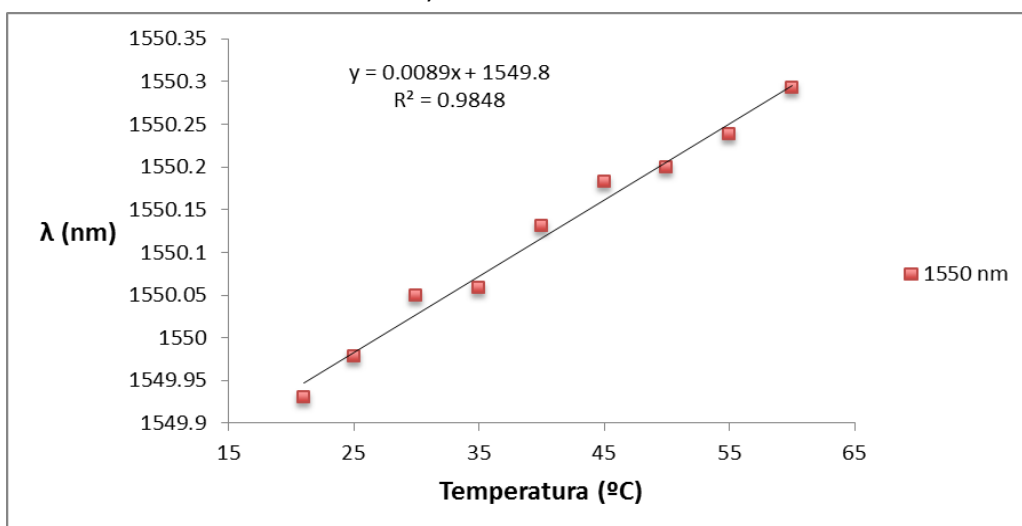
Tabla 12: Potencia media y variación máxima.

Los resultados de la Tabla 12 indican una correcta ecualización. La variación de potencia media entre los distintos canales es inferior a 1 dB y el nivel de potencia media es similar al obtenido en el apartado [3.2.2 Anillo de estabilidad](#), en torno a los -24 dBm. En cuanto al nivel OSNR este es de 46 dB. Respecto a la variación máxima los valores obtenidos son muy bajos, es decir, es muy estable. Para los tres canales se mantiene por debajo de los 4 dB.

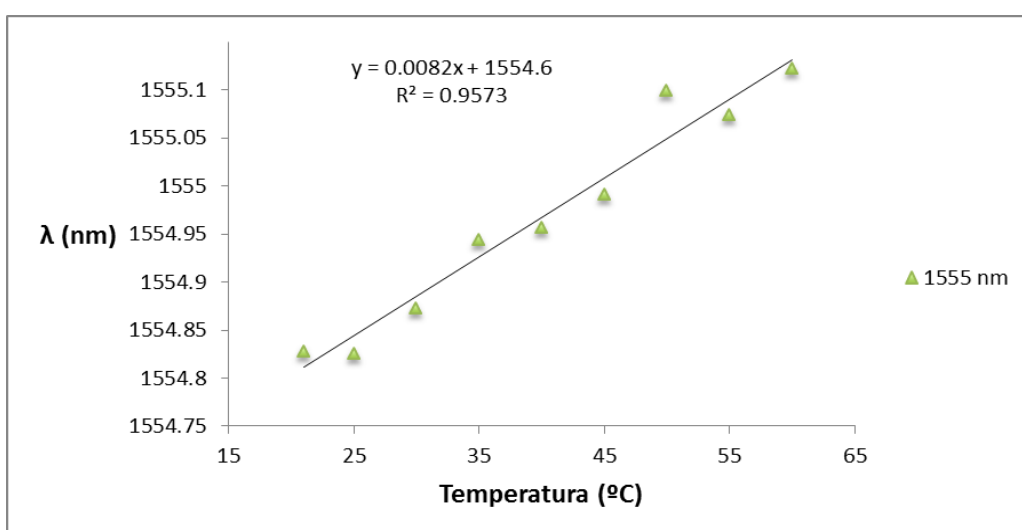
En la Figura 45, gráfica b) se muestra la respuesta completa del sensor, los tres canales, frente a la temperatura. Se ve claramente el incremento en la longitud de onda de cada canal a medida que la temperatura crece. A continuación se analizará esta variación más detenidamente para cada canal.



a) 1547 nm



b) 1550 nm



c) 1555 nm

Figura 46: Variación de  $\lambda$  al incrementar la temperatura.

La linealidad de la respuesta del sistema respecto a la temperatura es fundamental con el objetivo de lograr un sensor de temperatura fiable. Cuanto más lineal es la dependencia de la longitud de onda con la temperatura con mayor precisión y fiabilidad obtendremos la temperatura a partir de la variación de  $\lambda$ .

	1547 nm	1550 nm	1555 nm
$R^2$	0.9618	0.9848	0.9573

**Tabla 13: Valores de  $R^2$  para los distintos canales.**

El valor de  $R^2$  nos indica la linealidad de la gráfica, cuanto más próximo a 1 es  $R^2$  más lineal es. En los tres canales se obtienen valores de  $R^2$  superiores a 0.95 (Tabla 13), esto indica respuestas muy lineales.

El siguiente paso es calcular la sensibilidad de  $\lambda$  respecto a la temperatura, de esta manera se estima la temperatura en función del desplazamiento de  $\lambda$ .

	1547 nm	1550 nm	1555 nm
Sensibilidad [pm/°C]	7.7	8.9	8.2

**Tabla 14: Sensibilidad del sensor de temperatura.**

La Tabla 14 indica una sensibilidad de 7.7 pm/°C, 8.9 pm/°C y 8.2 pm/°C para los canales 1547 nm, 1550 nm y 1555 nm respectivamente. La sensibilidad del sistema se encuentra en torno a los 8 pm/°C, como era de esperar [14] [15].

### **3.2.4.3. Conclusiones**

En cuanto a la linealidad del sensor la variación de  $\lambda$  respecto a la temperatura es muy lineal, en los tres canales el valor de  $R^2$  se encuentra entre 0.9573 y 0.9618. Respecto a la sensibilidad el canal más sensible es el de 1550 nm con 8.9 pm/°C y el menos el canal de 1547 nm con 7.7 pm/°C. Estos dos resultados son lo suficientemente cercanos como para considerar la respuesta del sensor independiente del canal. En vista de estos resultados se puede afirmar que el sistema es óptimo como sensor de temperatura [14] [15].

### 3.3. Implementación del sistema remoto

#### 3.3.1. Introducción

A lo largo del trabajo, hasta este punto, se estudió el comportamiento del láser multi-longitud de onda y se propusieron cambios en el diseño para mejorar la estabilidad. Por un lado se introdujo el anillo de estabilidad, que redujo las inestabilidades en la respuesta del sistema de forma significativa. A lo largo del punto [3.2.2 Anillo de estabilidad](#) se probaron distintas longitudes de fibra SMF en el anillo, finalmente se escogió 5 km como la longitud adecuada por su estabilidad y pocas pérdidas introducidas. A continuación, en el [punto 3.2.3 Otras configuraciones del splitter de salida](#), se estudió la importancia de escoger un splitter de salida adecuado. Si bien los splitters 99:1 y 95:5 mejorarían la estabilidad considerablemente, la alta atenuación en el puerto de salida supondría un problema en el sistema remoto a 25 Km. Por este motivo se decidió mantener el splitter 90:10 inicial.

El siguiente paso consistió en probar el funcionamiento del sistema como sensor de temperatura. Los resultados obtenidos en el apartado [3.2.4 Sensor de temperatura](#) muestra la relación prácticamente lineal de la temperatura y la longitud de onda de trabajo del sistema, con una sensibilidad entre 7.7 y 8.9 pm/°C. Estos resultados respaldan el funcionamiento del sistema como sensor de temperatura.

Una vez obtenida la configuración óptima y comprobado su funcionamiento como sensor de temperatura, el último paso es la implementación del sistema remoto. Para ello, en primer lugar, se estudiará la configuración remota del láser multi-longitud de onda. Una vez hallada una configuración funcional, se procederá a la implementación del sistema como un sensor de temperatura remoto a 25 km.

#### 3.3.2. Desarrollo del sistema remoto

##### 3.3.2.1. Configuración 1

En este apartado se estudiarán los resultados de la implementación del sistema remoto siguiendo la siguiente configuración:

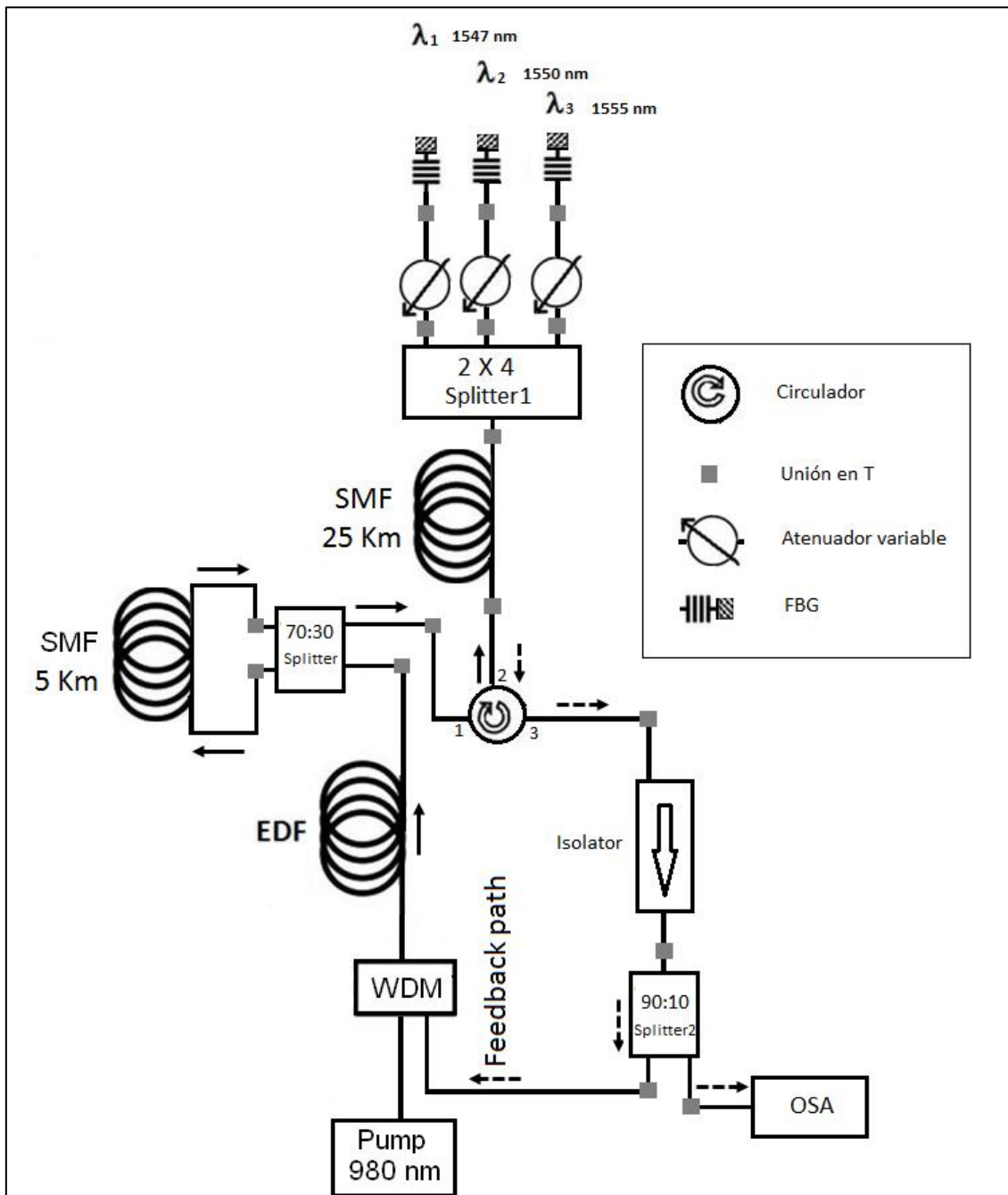


Figura 47: Esquema del circuito.

Esta configuración del sistema remoto parece la óptima, situando el carrete de fibra SMF de 25 km entre el circulador y el splitter1, hará falta un único carrete para implementar el diseño.

### 3.3.2.1.1. Resultados

Antes de ecualizar la respuesta, con los atenuadores variables, se obtuvo el siguiente resultado:

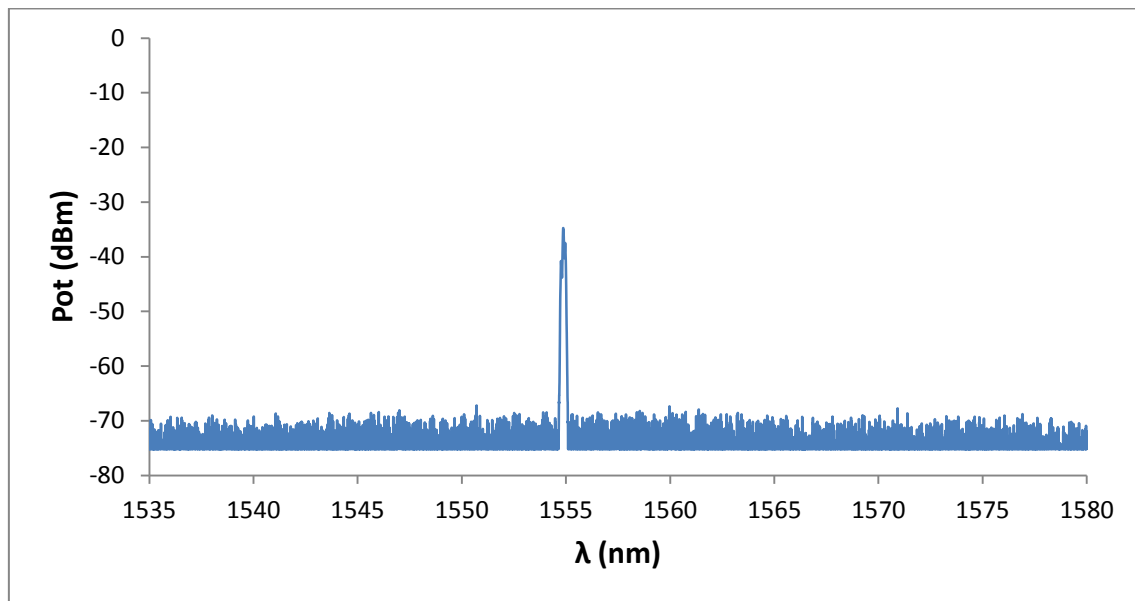
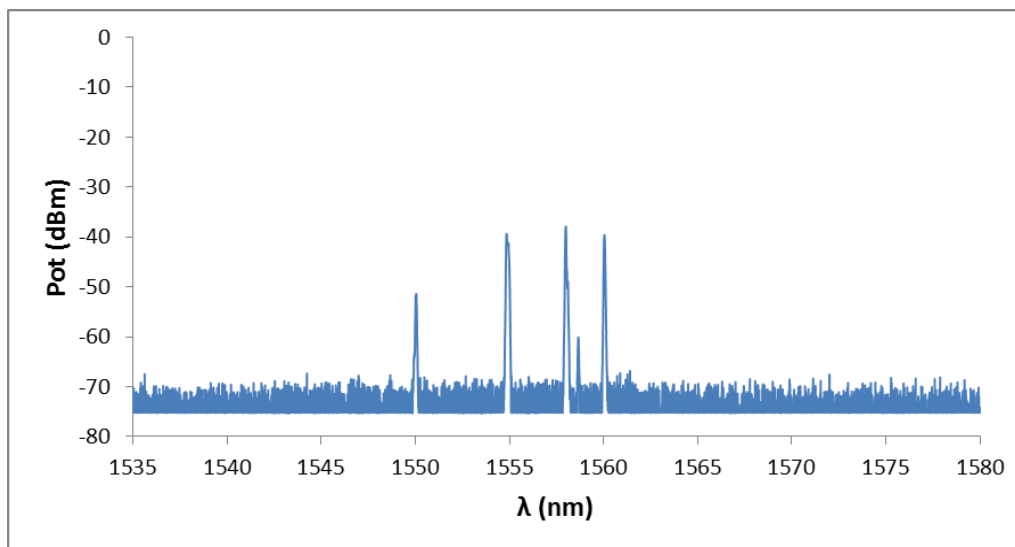


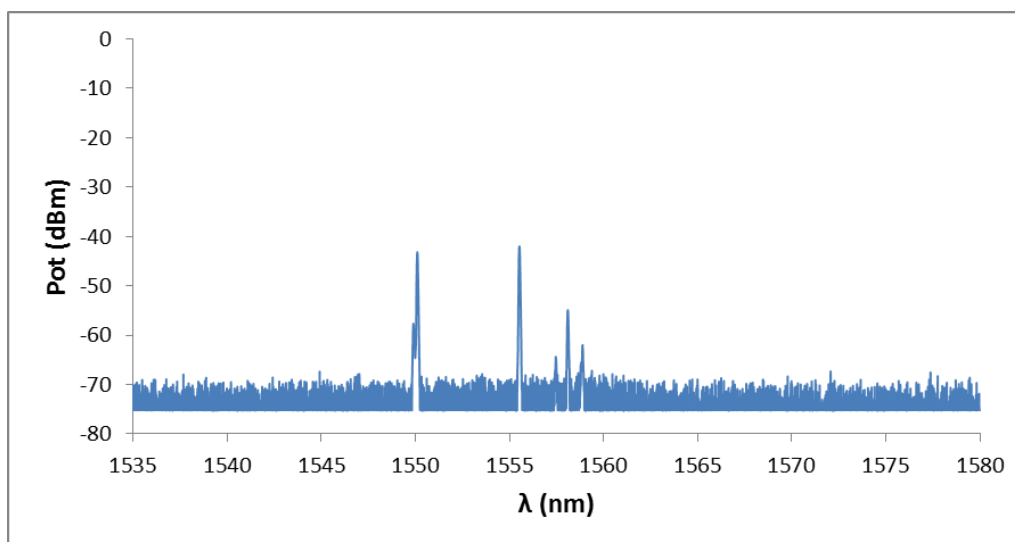
Figura 48: Respuesta del diseño remoto sin ecualizar.

Como se ve en la Figura 48 solo aparece un único canal, el de 1555 nm. Este resultado es habitual antes de ecualizar. Tras tratar de ecualizar los canales se obtuvieron las siguientes respuestas:





a)



b)

**Figura 49:** a) Respuesta del sistema remoto tras ecualizar. b) Respuesta del sistema remoto tras ecualizar 1555 nm nuevamente.

En la Figura 49, imagen a), se ven los canales de 1550 y 1555 nm con niveles de señal de -54 y -42 dBm respectivamente y un nivel de OSNR de 16 dB en el peor caso. Sin embargo también surgen nuevas señales en las longitudes de onda 1558 y 1560 nm, con niveles de potencia óptica de -40 y -42 dBm respectivamente. Un gran problema de estas nuevas frecuencias es la potencia, las nuevas señales absorben potencia de los otros canales y de esta manera el canal de 1547 nm no aparece.

Esta situación está causada por el fenómeno no lineal FWM (2.2.5.5 Mezclado de cuatro ondas). En el carrete de 25 Km se mezclan las señales dando lugar a nuevas frecuencias. Calculando las nuevas frecuencias obtenemos:

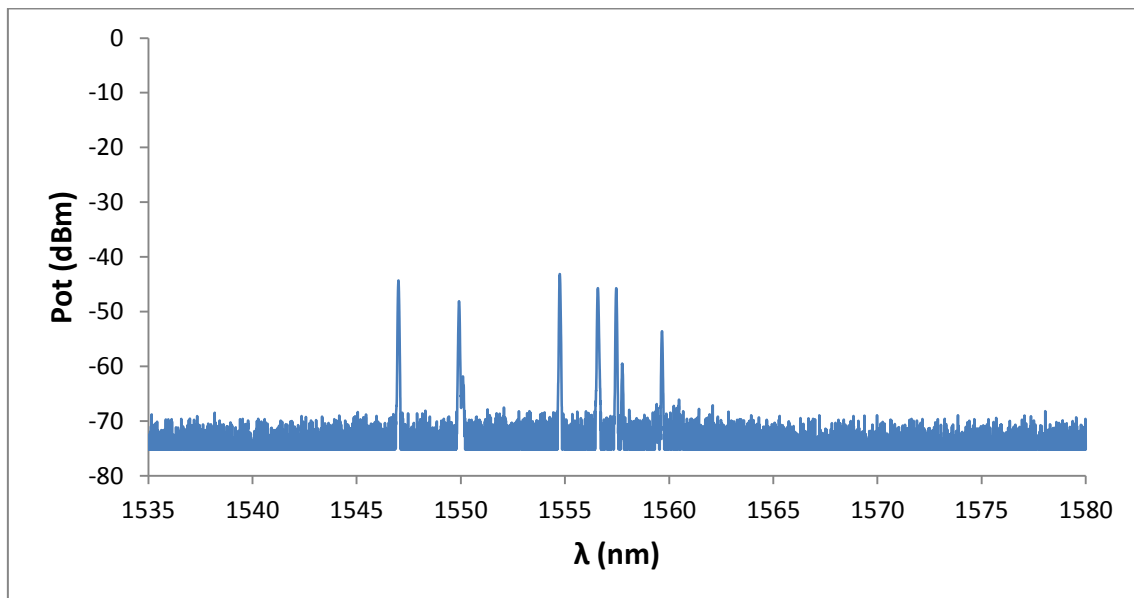
$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (k \neq i, j; 1:1547 \text{ nm}, 2:1550 \text{ nm y } 3:1555 \text{ nm})$$

$\lambda_{113}$	$\lambda_{213/123}$	$\lambda_{112}$	$\lambda_{223}$	$\lambda_{132/312}$	$\lambda_{221}$	$\lambda_{231/321}$	$\lambda_{332}$	$\lambda_{331}$
1539 nm	1542 nm	1544 nm	1545 nm	1552 nm	1553 nm	1558 nm	1560 nm	1563 nm

**Tabla 15: Frecuencias interferentes.**

En la Figura 49, imagen a), surgen las señales de 1558 nm ( $\lambda_{231/321}$ ) y 1560 nm ( $\lambda_{332}$ ). En la imagen b) se ve como al atenuar el canal de 1555 nm el nivel del canal de 1550 nm mejora. Al reducir la potencia del canal de 1555 nm la señal situada en 1560 nm ( $\lambda_{332}$ ) desaparece y la señal situada en 1558 nm ( $\lambda_{231/321}$ ) reduce su nivel considerablemente. Sin embargo el canal de 1547 nm no aparece todavía.

Tras atenuar los canales de 1550 y 1555 nm hasta el canal de 1547 nm aparezca se obtiene el siguiente resultado:



**Figura 50: Ecuación del sistema remoto hasta que aparece el canal de 1547 nm.**

En esta ocasión se logra que los tres canales del láser aparezcan (1547 nm, 1550 nm y 1555 nm) con niveles de potencia entre los -45 y -50 dBm y un ONSR mínimo de 25 dB. Pero de nuevo surgen señales indeseadas, en frecuencias combinación de los canales, con niveles de potencia entre los -46 y -57 dBm.

Una solución ante el FWM es reducir el nivel de potencia, a continuación se muestra el resultado obtenido tras reducir la intensidad a bombeo de 400 mA a 200 mA.

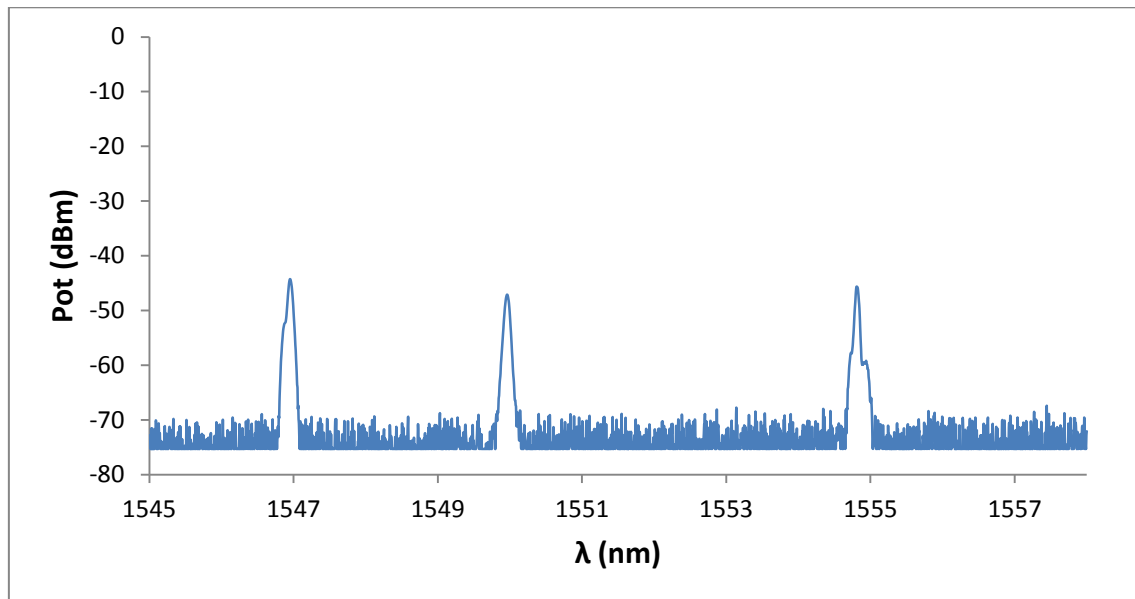


Figura 51: Respuesta del sistema al reducir la intensidad de bombeo.

Las señales a frecuencias 1547 nm, 1550 nm y 1555 nm tienen un nivel de potencia de -46 dBm, -48 dBm y -47 dBm respectivamente, respecto al OSNR 22 dB en el peor caso (1550 nm). Las frecuencias interferentes desaparecen, ya no absorben potencia y con ello mejora el nivel de los picos del láser.

### 3.3.2.2. Configuración 2

Para solucionar el problema encontrado en la configuración 1 se propuso el siguiente diseño:

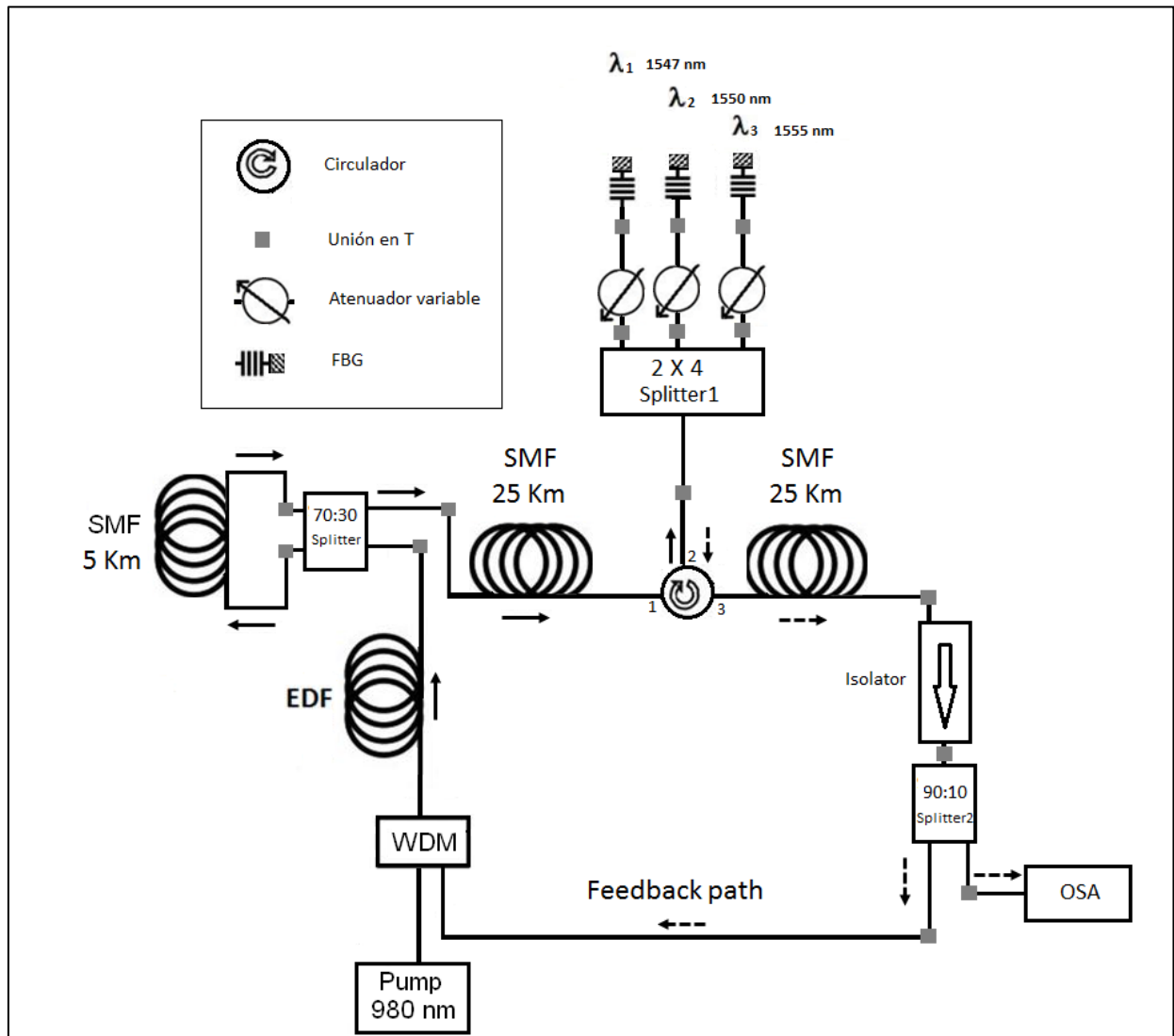


Figura 52: Esquema del circuito.

En este caso se emplean dos carretes SMF de 25 km cada uno. Cada carrete se sitúa en el puerto 1 y 3 del circulador, uno conectado al EDF y el otro al aislador. El resto del circuito permanece inalterado.

### 3.3.2.2.1. Resultados

Una vez implementado el diseño se obtuvo el siguiente resultado:

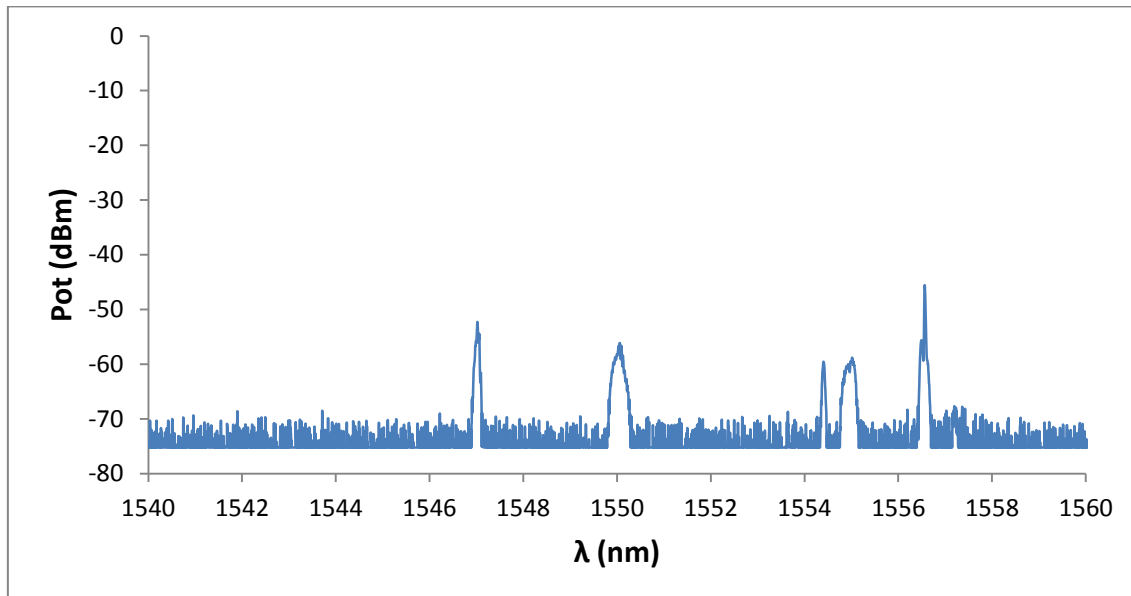


Figura 53: Respuesta del sistema.

En la Figura 53 se ven los tres picos del láser, 1547 nm, 1550 nm y 1555 nm, con niveles de potencia óptica de -55, -57 y -60 dBm respectivamente y con un nivel de OSNR en el peor caso de 10 dB en 1555 nm. Sin embargo los problemas de nuevas frecuencias persisten, en la Figura 53 también se ve una señal en 1556.5 nm con un nivel de potencia de -46 dBm, 9 dB superior al mejor pico del láser.

De nuevo este diseño no sirve, sin embargo si aplicamos un pequeño cambio adicional y movemos el aislador de posición:

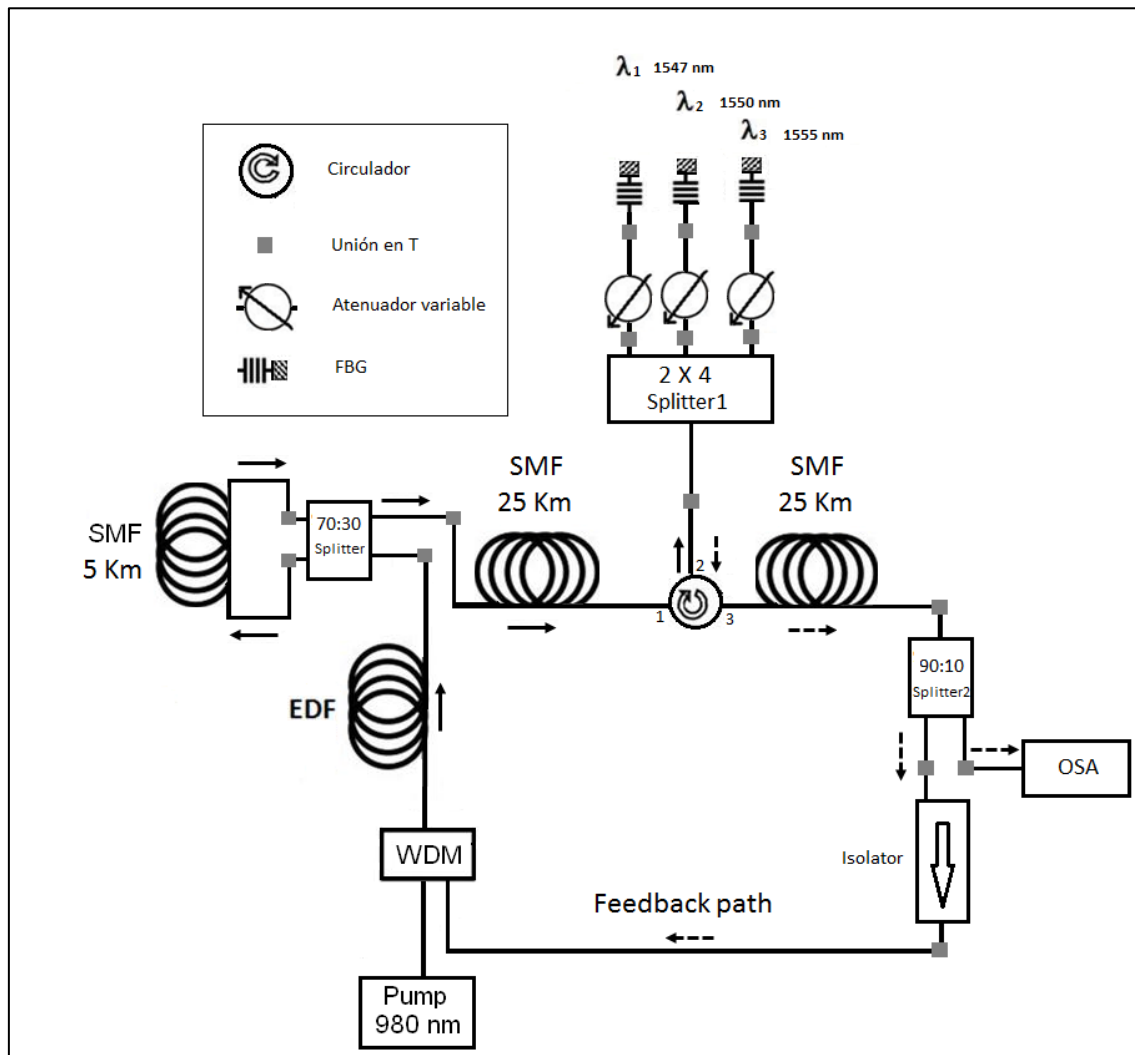


Figura 54: Esquema del circuito.

En esta configuración el aislador se encuentra entre el WDM y el splitter2. Aplicando este cambio en el diseño se obtuvo la siguiente respuesta del sistema:

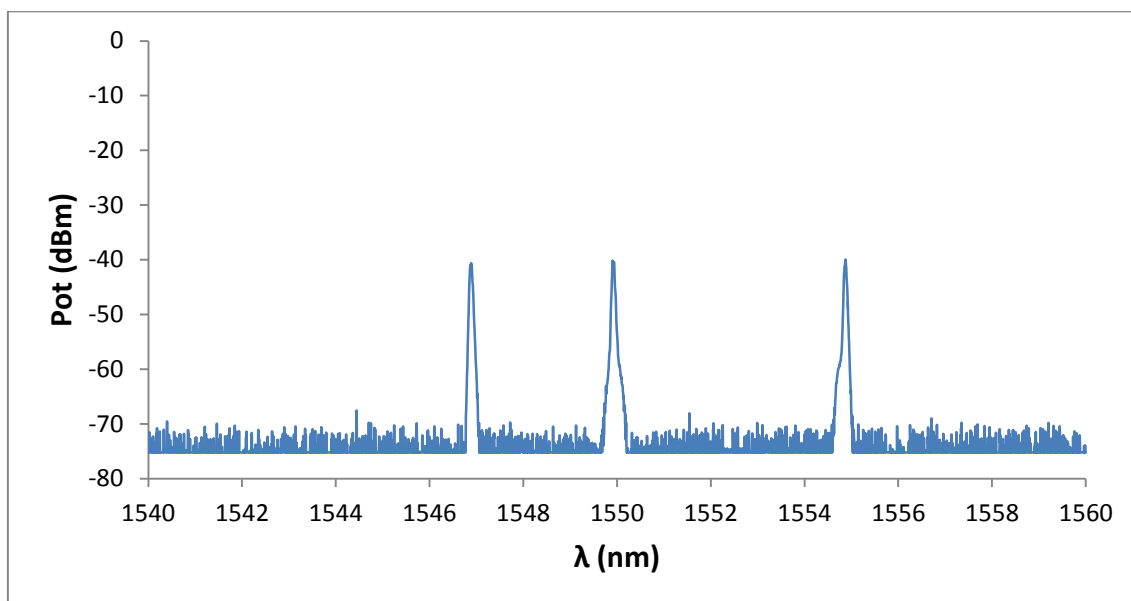


Figura 55: Respuesta del circuito.

Se observan claramente los tres picos del láser en 1547 nm con -43 dBm, en 1550 nm con -42 dBm y 1555 nm con -42 dBm. El nivel del OSNR es de 27 dB en el peor caso (1547 nm). Ya no aparecen picos a otras frecuencias.

### 3.3.2.3. Conclusiones

La configuración 1 solo necesita un carrete SMF de 25 km, pero para niveles de bombeo altos surgen señales interferentes cerca de los canales del láser. La solución a este problema es reducir la intensidad de bombeo a 200 mA, pero esto implica reducir la potencia de salida del láser a -47 dBm y el nivel OSNR a 23 dB.

La configuración 2 necesita dos carretes SMF de 25 km. Tras mover el aislador de posición los problemas de frecuencias adicionales desaparecen. En cuanto a los niveles de potencia y OSNR se obtuvieron -42 dBm y 28 dB respectivamente.

La configuración 2 obtiene niveles de potencia y OSNR 5 dB superiores respecto a la configuración 1. Por este motivo y teniendo en cuenta la importancia de los niveles de potencia y OSNR en un sistema remoto, se escogió la configuración 2 como la óptima a pesar de necesitar un carrete de fibra extra.

### 3.3.3. Sensor de temperatura remoto

A lo largo del trabajo se han ido probando cambios que mejorasen la estabilidad y la respuesta del sistema. Primero mediante el anillo de estabilidad, donde se decidió emplear 5 km para mejorar la estabilidad del sistema. Después se probaron distintas relaciones de acoplo en el splitter 2, que demostraron no ser eficaces a la hora de implementar el sistema remoto y por este motivo se decidió dejar el splitter 90:10 inicial. A continuación, tras probar el sistema como sensor de temperatura no remoto, se estudió la manera de llevar a cabo el sistema remoto. En el apartado anterior, [3.3.2 Desarrollo del sistema remoto](#), se estudiaron las dos opciones propuestas y en vista de los resultados se escogió la configuración 2, con el aislador tras el splitter2, como la configuración óptima.

En este punto se sumará todo lo aprendido hasta ahora para llevar a cabo el sistema remoto como sensor de temperatura.

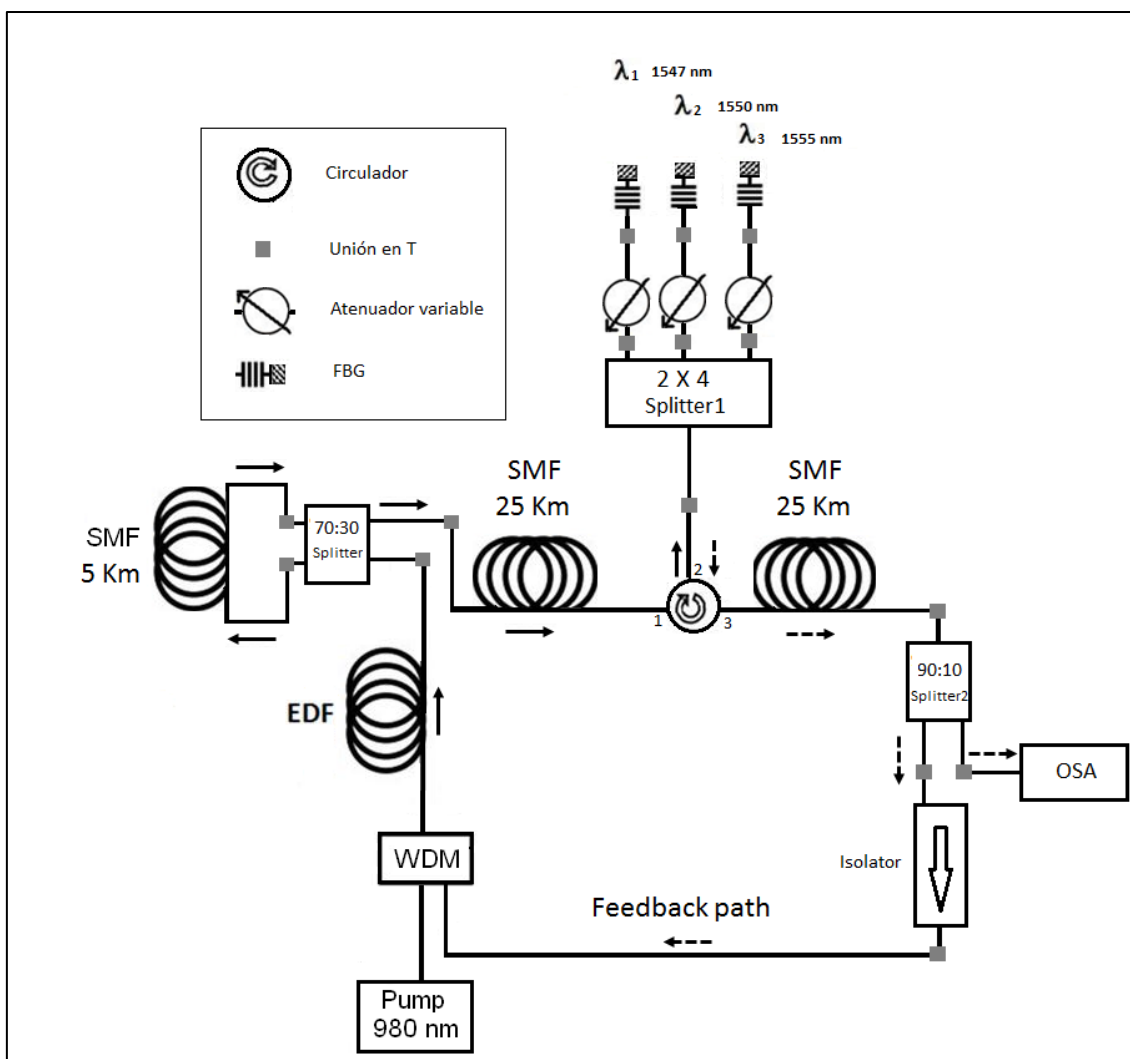
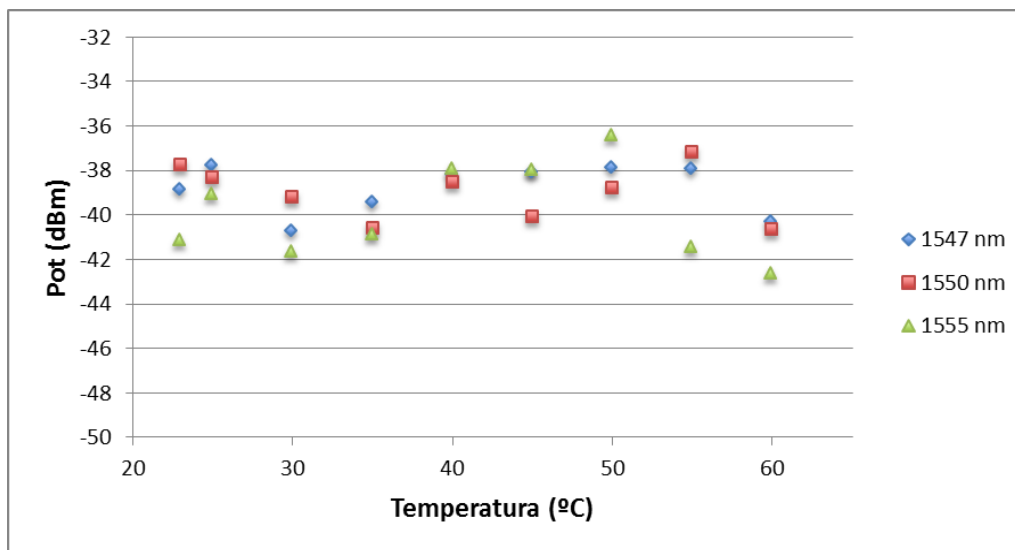


Figura 56: Esquema del diseño propuesto.

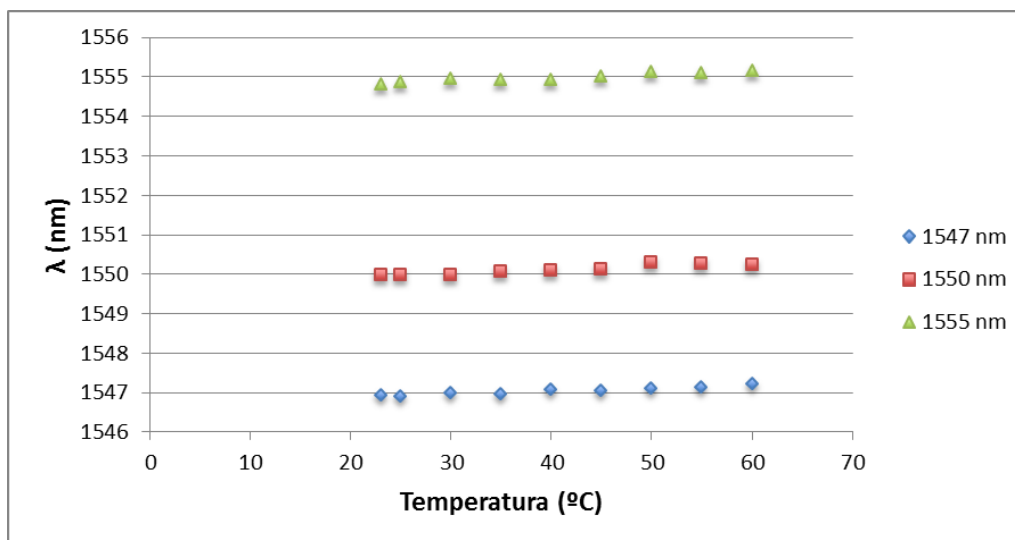


Para comprobar el funcionamiento del diseño, al igual que se hizo en el apartado 3.2.4 [Sensor de temperatura](#), los FBGs se introdujeron en la cámara climática. A continuación se incrementó la temperatura desde la temperatura ambiente (23 °C) hasta los 60 °C y se tomaron medidas del espectro resultante cada 5°C.

### 3.3.3.1. Resultados



a)



b)

Figura 57: a) Estabilidad del sistema. b) Variación de  $\lambda$  respecto a  $T$  (°C).

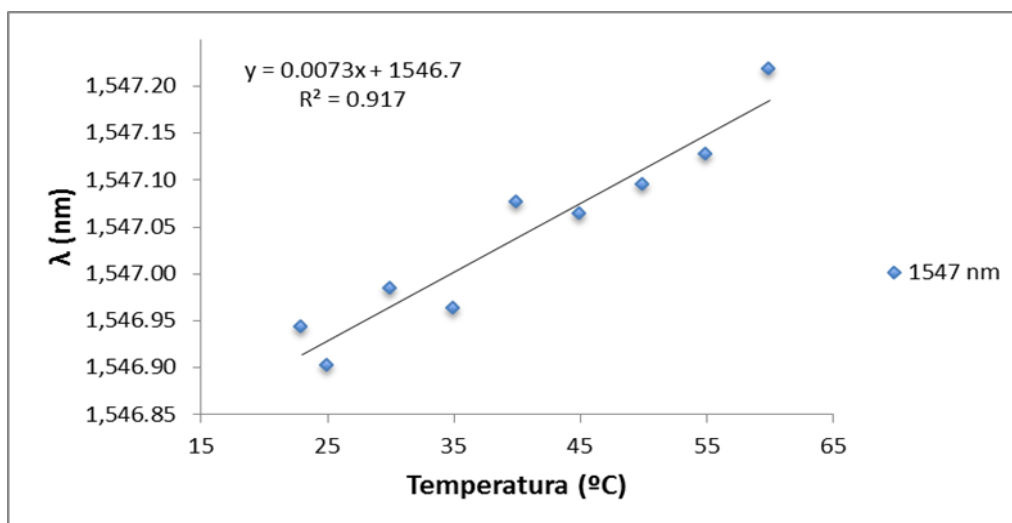
	Potencia media (dBm)	Variación máxima* (dB)
1547 nm	-38.67	2.96
1550 nm	-38.86	3.5
1555 nm	-39.42	6.19

\*Entre el máximo y mínimo, en valor absoluto.

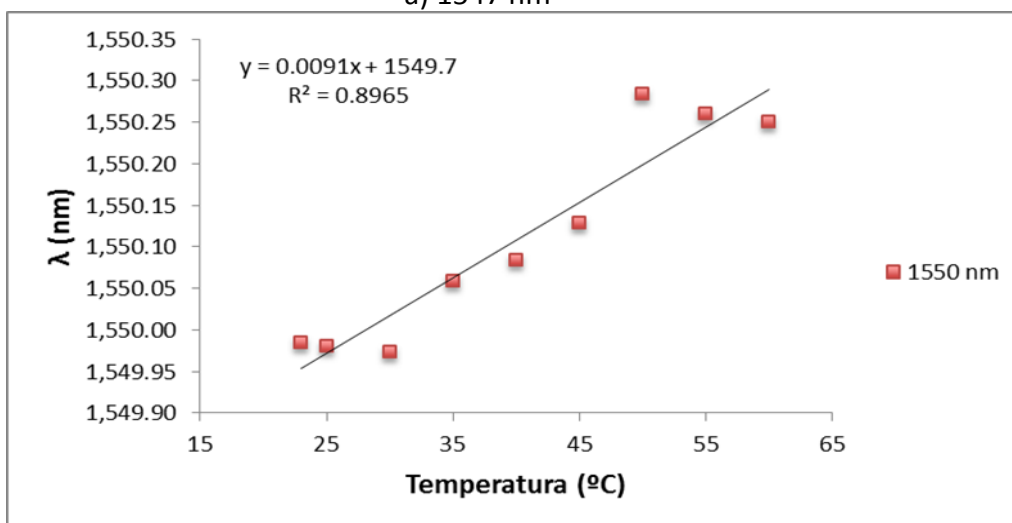
**Tabla 16: Potencia media y variación máxima.**

El nivel de potencia óptica logrado se encuentra en torno a los -39 dBm, con un nivel OSNR de 31 dB. La ecualización de los picos es muy buena, la diferencia de potencia media entre ellos es inferior a 1 dB. En cuanto a la variación máxima los canales de 1547 nm y 1550 nm se mantienen por debajo de los 5 dB, como se esperaba. Sin embargo el canal de 1555 nm llega a los 6.19 dB de variación máxima, 1.57 dB superior al peor resultado obtenido en el apartado [3.2.2 Anillo de estabilidad](#) con el carrete de 5 km (canal 1550 nm con 4.62 dB).

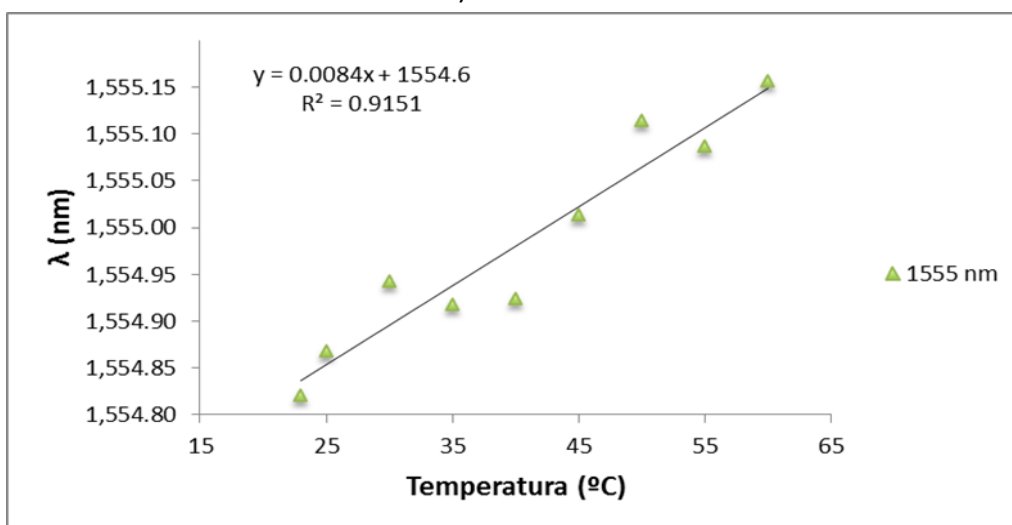
Respecto a la variación de la longitud de onda con la temperatura, en la Figura 57 imagen b), se aprecia una clara dependencia entre ellas. La longitud de onda aumenta a medida que la temperatura aumenta. A continuación se discutirán los resultados obtenidos para cada canal más detenidamente.



a) 1547 nm



b) 1550 nm



c) 1555 nm

Figura 58: Variación de  $\lambda$  al incrementar la temperatura.

Como ya se vio en el apartado 3.2.4 Sensor de temperatura, es importante la linealidad de la dependencia de  $\lambda$  respecto a la temperatura. De esta manera cuanto más lineal resulta la gráfica, mayor precisión y fiabilidad tendrá nuestro sistema como sensor de temperatura.

	1547 nm	1550 nm	1555 nm
$R^2$	0.9170	0.8965	0.9151

**Tabla 17: Valores de  $R^2$  para los distintos canales.**

Si comparamos los valores de  $R^2$  obtenidos en el sistema remoto y no remoto:

$\lambda$	$R^2$	
	Sistema no remoto	Sistema remoto
1547 nm	0.9618	0.9170
1550 nm	0.9848	0.8965
1555 nm	0.9573	0.9151

**Tabla 18: Comparación del sistema remoto y no remoto.**

El sistema no remoto presenta valores de  $R^2$  ligeramente superiores, sin embargo los valores obtenidos para el sistema remoto son lo suficientemente cercanos a 1 (linealidad total) que la dependencia de  $\lambda$  con la temperatura se puede considerar lineal. Es decir, el sistema es válido como sensor de temperatura.

A continuación, una vez verificada la linealidad del sensor de temperatura, se procede a comprobar su sensibilidad, es decir, la variación de  $\lambda$  respecto a  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

	1547 nm	1550 nm	1555 nm
Sensibilidad [ $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ ]	7.3	9.1	8.4

**Tabla 19: Sensibilidad del sensor.**

Los resultados entran dentro de lo esperado, lo habitual son  $9 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ . El sistema es lo suficientemente sensible como para detectar las variaciones de temperatura.

De nuevo si lo comparamos con la sensibilidad obtenida del sistema no remoto:

$\lambda$	Sensibilidad [pm/°C]	
	Sistema no remoto	Sistema remoto
1547 nm	7.7	7.3
1550 nm	8.9	9.1
1555 nm	8.2	8.4

**Tabla 20: Comparativa de la sensibilidad del sistema remoto y no remoto.**

Los valores de sensibilidad obtenidos en el sistema remoto son muy similares a los obtenidos en el sistema no remoto. El canal de 1547 nm es ligeramente menos sensible en el sistema remoto mientras que los canales de 1550 nm y 1555 nm son ligeramente más sensibles al cambio de temperatura. Estas diferencias son realmente pequeñas, 0.4 pm/°C en el peor caso (1547 nm), y se pueden despreciar.

### **3.3.3.2. Conclusiones**

En vista de los resultados obtenidos el sistema remoto es lo suficientemente lineal como para considerarlo un sensor de temperatura fiable, sus valores de  $R^2$  son muy cercanos a 1. En cuanto a su sensibilidad, mantiene unos resultados muy similares al sistema no remoto. Los valores de sensibilidad se encuentran entre 7.3 y 9.1 pm/°C, en torno a los 8 pm/°C esperados [14][15]. Siendo la respuesta altamente lineal y capaz de detectar las variaciones de temperatura, se concluye que efectivamente el sistema es válido como sensor remoto de temperatura.

## 4. Conclusiones

Este trabajo se puede dividir en dos partes: por un lado el diseño y optimización del láser multi-longitud de onda y por otro su funcionamiento como sensor.

Desde el punto de vista del láser el primer paso, [3.2.1 Esquema inicial](#), consistió en el diseño de un láser multi-longitud de onda de fibra dopada con erbio y realimentación en anillo. Una vez completo el montaje y ecualizados los canales se obtuvieron niveles de señal y OSNR de -25 dBm y 45 dB respectivamente.

En vista del buen nivel de potencia y OSNR alcanzados el siguiente punto, [3.2.2 Anillo de estabilidad](#), se centra en la estabilidad. Tras probar distintas longitudes de carrete SMF finalmente se escogió la configuración de 5 km como la óptima, debido a su buen nivel de señal (-23 dBm) y buena estabilidad (variación máxima inferior a 5 dB en los tres canales).

El siguiente paso, [3.2.3 Otras configuraciones del splitter de salida](#), consistió en probar distintas relaciones en el splitter de salida (splitter2). La estabilidad mejoró considerablemente con el uso del splitter 99:1, variación máxima en los tres canales inferior a 2 dB. Sin embargo en el sistema remoto el nivel de potencia alcanzado resultó ser muy bajo, del orden de -59 dBm. En el caso del splitter 95:5 los problemas residían en una gran dificultad para ecualizar los canales y enmascaramiento ocasional de alguno de los canales del láser. Por estos motivos se decidió mantener el splitter 90:10 inicial.

Una vez concluida la optimización del láser comienza la parte orientada al sensor. En el punto, [3.2.4 Sensor de temperatura](#), se estudió el comportamiento del láser como sensor de temperatura. Se obtuvieron valores de  $R^2$  superiores a 0.95, lo que indica gran linealidad de la dependencia de  $\lambda$  del sistema con la temperatura. En cuanto a la sensibilidad esta se encontraba entre 7.7 y 8.9 pm/°C.

Llegados a este punto solo queda la implementación del sensor remoto de temperatura. En el apartado, [3.3.2 Desarrollo del sistema remoto](#), se estudiaron dos configuraciones del sistema remoto. Finalmente, tras solucionar los problemas de frecuencias interferentes cercanas a los canales del láser, se decidió optar por la [configuración 2](#) (con el aislador situado tras el splitter2). De esta manera se obtuvieron niveles de potencia óptica de -42 dBm y OSNR de 28 dB.

Una vez decidida la configuración remota sólo queda comprobar el funcionamiento del sistema como sensor de temperatura remoto. En el apartado [3.3.3 Sensor de temperatura remoto](#) se obtuvieron valores de  $R^2$  superiores a 0.89, ligeramente inferiores al sistema no remoto pero aun así lo suficientemente cercanas a 1 como para considerar la respuesta lineal. En cuanto a la sensibilidad esta se encuentra entre 7.3 y 9.1 pm/°C para los tres canales.

En vista de los resultados presentados a lo largo del trabajo se concluye que el sistema diseñado funciona correctamente como láser multi-longitud de onda, con niveles de potencia y OSNR elevados y buena estabilidad. Su funcionamiento como sensor remoto, particularmente

la sensibilidad obtenida, entra dentro de los valores esperados ( $8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ) demostrando ser un sistema fiable y capaz.

## 5. Bibliografía

- [1] Gerd Keiser, "Optical Fiber Communications". McGraw-Hill. Segunda edición. 1991. ISBN: 0-07-100785-7.
- [2] Josias Johannes Le Roux, "Methodologies Used for Increasing the Output Power of an Erbium Doped Fibre Ring Laser", Tesis, 2014.
- [3] Rodolfo Martinez, "Desarrollo de un láser de fibra óptica sintonizable en longitud de onda para interrogación de sensores". Tesis de maestría, 2004.
- [4] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems". New York : Wiley-Interscience. 2002. ISBN: 0-471-21571-6.
- [5] Daniel ventura, "Estudio experimental de un conversor en longitud de onda usando láseres de fibra óptica". Trabajo fin de grado, 2016.
- [6] M. C. Paul, A. Dhar, S. Das, M. Pal, S. K. Bhadra, A. M. Markom, N.S. Rosli, A. Hamzah, H. Ahmad y S. W. Harun. "Enhanced Erbium–Zirconia–Yttria–AluminumCo-Doped Fiber Amplifier". IEEE Photonics Journal, vol. 7, no. 5. Octubre 2009.
- [7] C. Randy Giles. "Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers". JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 9, no. 2. Febrero 1991.
- [8] S. Diaz, D. Leandro, M. Lopez-Amo. "Stable Multiwavelength Erbium Fiber Ring Laser With Optical Feedback for Remote Sensing". JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 33, no. 12. Junio 2015.
- [9] Isidoro Ibáñez, "Desarrollo de estructuras avanzadas para láseres multilínea de fibra óptica". Trabajo fin de carrera, 2012.
- [10] Francisco J Madruga, Nicolás Becue, Antonio Quintela, Olga M. Conde y José M. López Higuera. "Red de difracción optimizada para aplicaciones en redes de interferómetros Fabry-Perot".



- [11] Verónica de Miguel Soto. “Desarrollo de láser random de fibra óptica multi-longitud de onda conmutable y reconfigurable en tiempo real para interrogación remota de sensores” Trabajo fin de carrera, 2014.
  
- [12] Qhumayo S., Rodolfo Martínez Manuel y Grobler M. “Wavelength and Power Stabilization of a three wavelength Erbium doped fiber laser using a Nonlinear Optical Loop Mirror”. AFRICON 2015.
  
- [13] L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo, and M. López-Amo. “Multiwavelength Fiber Laser Sources with Bragg-Grating Sensor Multiplexing Capability”. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 19, no. 4. Abril 2001.
  
- [14] S. Diaz, M. Lopez-Amo. “Stable dual-wavelength erbium fiber laser for temperature measurements”. Proc. of SPIE Vol. 9634, pp. 9634761-4, Curitiba (Brazil), 2015.
  
- [15] S. Diaz. “Stable dual-wavelength erbium fiber ring laser with optical feedback for remote sensing”. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 34, no. 20. 2016.

## 6. Anexo

A continuación se adjuntan las hojas de características de los componentes empleados a lo largo del trabajo:



## Atenuadores variables



### Características

- Altas pérdidas de retorno.
- Mínimas pérdidas de inserción.
- Estable con las condiciones climáticas.
- Fácil de manejar.
- Amplio rango de atenuación.
- Resolución de ajuste de atenuación ultrafina.

Para aplicaciones en entornos de fibra óptica, donde es necesario reducir el nivel de potencia óptica en la fibra de forma gradual. Los atenuadores ópticos variables son componentes de muy fácil utilización e instalación y que permiten ajustar la potencia óptica gracias a un rango muy amplio de atenuación disponible.

### Construcción

El proceso de fabricación de estos atenuadores permite ofrecer altas pérdidas de retorno y un excelente rango de atenuación controlado por los giros de un tornillo accionador. Los atenuadores utilizan tecnología optomecánica para crear el nivel de atenuación deseado.

### Aplicaciones

- Telecomunicaciones.
- Sensores de fibra óptica.
- Equipos de medida.
- Test de equipamiento.
- Sistemas de distribución de vídeo.
- En enlaces cortos para evitar la saturación en el receptor.

### Especificaciones

Parámetro	Valor
Longitud de onda de operación	1.310 nm / 1.550 nm
Rango de atenuación	> 35 dB
Resolución	$0.01\text{ dB} < x < 0.25\text{ dB}$
Pérdidas de retorno	< -70 dB o según conectorización
Pérdidas de inserción	< 0.75 dB (sin conectorizar)
Temperatura de operación	-40 °C a -80 °C
Terminación (consultar otros)	FC/PC, FC/APC, SC/PC, SC/APC, ST



## Compact Laser Diode Controller

# CLD101x Operation Manual



2014

---

Version: 1.4  
Date: 12-Jun-2014

## 6 Appendix

### 6.1 Technical Data

Specification CLD1015	Front Panel*	Remote Control*
Current Control (Constant Current Mode); AG		
Control Range	0 to 1.5 A	
Compliance Voltage	>4 V	
Resolution	100 μA	50 μA
Accuracy	±(0.1% + 500 μA)	
Noise and Ripple (10 Hz to 10 MHz, rms, typ.) w/o Filter with Filter	10 μA 5 μA (Load 3.3 Ω, current < 1.2 A)	
Drift, 24 hours (0-10 Hz, typ., at Constant Ambient Temperature)	<50 μA	
Temperature Coefficient	<50 ppm/°C	
Current Limit		
Setting Range	1 mA to 1.5 A	
Resolution	100 μA	50 μA
Accuracy	±(0.12% + 800 μA)	
Photodiode Input (CG)		
Photo Current Measurement Ranges	2 mA / 20 mA	
Photo Current Resolution	100 nA / 1 μA	70 nA / 700 nA
Photo Current Accuracy	±(0.08% +0.5 μA) / ±(0.08% +5 μA)	
Photodiode Reverse Bias Voltage	0.1 to 6 V	
Photodiode Input Impedance	~0 Ω (Virtual Ground)	
Power Control (Constant Power Mode)		
Photo Current Control Ranges	0 to 2 mA / 0 to 20 mA	
Laser Voltage Measurement		
Resolution	1 mV	200 μV
Accuracy	±(1% + 40 mV)	
Laser Overvoltage Protection		
Trip Voltage (typ.)	4.2 V	
Modulation Input		
Input Impedance	10 kΩ	
Small Signal 3dB Bandwidth, CC Mode w/o filter with filter	DC to 250 kHz DC to 7.5 kHz	
Modulation Coefficient, CC Mode	150 mA/V ±5%	
Modulation Coefficient, CP Mode Photo Current Range Low Photo Current Range High	200 μA/V ±5% 2 mA/V ±5%	

\*) Via front panel the resolution is limited by the display. Via Remote Control a higher resolution is offered.

\*\*) Control range and thermal stability depend on thermistor parameters and operating point.

Specification CLD1010LP	Front Panel*	Remote Control*
Current Control (Constant Current Mode); AG		
Control Range	0 to 1.0 A	
Compliance Voltage	>7 V	
Resolution	100 μA	50 μA
Accuracy	±(0.1% + 500 μA)	
Noise and Ripple (10 Hz to 10 MHz, rms, typ.) w/o Filter with Filter	10 μA 5 μA (Load 4.7 Ω)	
Drift, 24 hours (0-10 Hz, typ., at Constant Ambient Temperature)	<50 μA	
Temperature Coefficient	<50 ppm/°C	
Current Limit		
Setting Range	1 mA to 1.0 A	
Resolution	100 μA	50 μA
Accuracy	±(0.12% + 800 μA)	
Photodiode Input (CG)		
Photo Current Measurement Ranges	2 mA / 20 mA	
Photo Current Resolution	100 nA / 1 μA	70 nA / 700 nA
Photo Current Accuracy	±(0.08% +0.5 μA) / ±(0.08% +5 μA)	
Photodiode Reverse Bias Voltage	0.1 to 6 V	
Photodiode Input Impedance	~0 Ω (Virtual Ground)	
Power Control (Constant Power Mode)		
Photo Current Control Ranges	0 to 2 mA / 0 to 20 mA	
Laser Voltage Measurement		
Resolution	1 mV	400 μV
Accuracy	±(1% + 80 mV)	
Laser Overvoltage Protection		
Trip Voltage (typ.)	7.3 V	
Modulation Input		
Input Impedance	10 kΩ	
Small Signal 3dB Bandwidth, CC Mode w/o filter with filter	DC to 300 kHz DC to 9.0 kHz	
Modulation Coefficient, CC Mode	150 mA/V ±5%	
Modulation Coefficient, CP Mode Photo Current Range Low Photo Current Range High	200 μA/V ±5% 2 mA/V ±5%	
RF Input		
RF Input Impedance	50 Ω	
Small Signal 3 dB Bandwidth	200 kHz to > 1 GHz	
Maximum RF Power	500 mW	

\*) Via front panel the resolution is limited by the display. Via Remote Control a higher resolution is offered.

\*\*) Control range and thermal stability depend on thermistor parameters and operating point.

Specification CLD1011LP	Front Panel*	Remote Control*
Current Control (Constant Current Mode); CG		
Control Range	0 to 1.0 A	
Compliance Voltage	>8 V	
Resolution	100 μA	50 μA
Accuracy	±(0.1% + 500 μA)	
Noise and Ripple (10 Hz to 10 MHz, rms, typ.) w/o Filter with Filter	10 μA 5 μA (Load 4.7 Ω)	
Drift, 24 hours (0-10 Hz, typ., at Constant Ambient Temperature)	<50 μA	
Temperature Coefficient	<50 ppm/°C	
Current Limit		
Setting Range	1 mA to 1.0 A	
Resolution	100 μA	50 μA
Accuracy	±(0.12% + 800 μA)	
Photodiode Input (CG or AG, switchable)		
Photo Current Measurement Ranges	2 mA / 20 mA	
Photo Current Resolution	100 nA / 1 μA	70 nA / 700 nA
Photo Current Accuracy	±(0.08% +0.5 μA) / ±(0.08% +5 μA)	
Photodiode Reverse Bias Voltage	0.1 to 6 V	
Photodiode Input Impedance	~0 Ω (Virtual Ground)	
Power Control (Constant Power Mode)		
Photo Current Control Ranges	0 to 2 mA / 0 to 20 mA	
Laser Voltage Measurement		
Resolution	1 mV	400 μV
Accuracy	±(1% + 80 mV)	
Laser Overvoltage Protection		
Trip Voltage (typ.)	8.2 V	
Modulation Input		
Input Impedance	10 kΩ	
Small Signal 3dB Bandwidth, CC Mode w/o filter with filter	DC to 300 kHz DC to 9.0 kHz	
Modulation Coefficient, CC Mode	150 mA/V ±5%	
Modulation Coefficient, CP Mode Photo Current Range Low Photo Current Range High	200 μA/V ±5% 2 mA/V ±5%	
RF Input		
RF Input Impedance	50 Ω	
Small Signal 3 dB Bandwidth	200 kHz to > 1 GHz	
Maximum RF Power	500 mW	

\*) Via front panel the resolution is limited by the display. Via Remote Control a higher resolution is offered.

\*\*) Control range and thermal stability depend on thermistor parameters and operating point.



Specification CLD1015 / CLD1010LP / CLD1011LP	Front Panel*	Remote Control*
TEC Current Output		
Control Range	-3.0 to 3.0 A	
Compliance Voltage	> 4.7 V	
Maximum Output Power	> 14.1 W	
Resolution	1 mA	100 μA
Accuracy	± (0.2% + 20 mA)	
TEC Current Limit		
Setting Range	5 mA to 3.0 A	
Resolution	1 mA	100 μA
Accuracy	± (0.2% + 20 mA)	
NTC Thermistor Sensors		
Resistance Measurement Range	300 Ω to 150 kΩ	
Control Range Max.**	-55 °C to +150 °C	
Temperature Resolution	0.01 °C	
Resistance Resolution	1 Ω	
Accuracy	± (0.1% + 1 Ω)	
Temperature Stability (24 Hours typ.)**	<0.005 °C	
Temperature Coefficient	<5 mK/°C	
Temperature Window Protection		
Setting Range T <sub>win</sub>	0.01 °C to 100.0 °C	
Protection Reset Delay	0 to 600 s	
Interface		
USB 2.0	According to USBTMC/USBTMC-USB488 Specification Rev. 1.0	
Protocol	SCPI Compliant Command Set	
Drivers	<ul style="list-style-type: none"><li>• VISA VXIpn<sup>™</sup></li><li>• MS Visual Studio<sup>™</sup></li><li>• MS Visual Studio.net<sup>™</sup></li><li>• LabView<sup>™</sup></li><li>• LabWindows/CVI<sup>™</sup></li></ul>	

\*) Via front panel the resolution is limited by the display. Via Remote Control a higher resolution is offered.

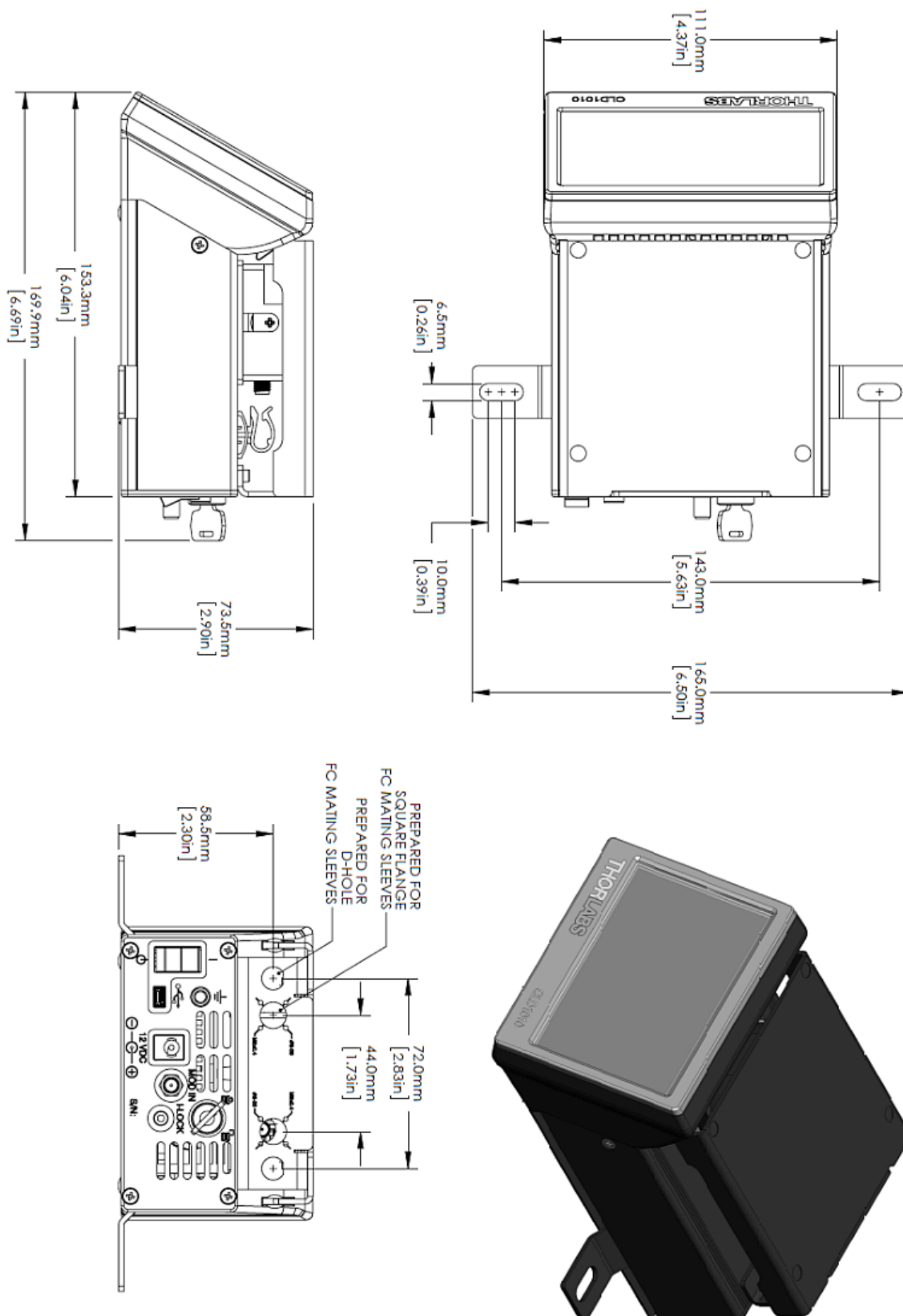
\*\*) Control range and thermal stability depend on thermistor parameters and operating point.

General data CLD1015 / CLD1010LP / CLD1011LP	
Safety Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interlock</li> <li>• Keylock Switch</li> <li>• Laser Current Limit</li> <li>• Soft Start</li> <li>• Short Circuit when Laser off</li> <li>• Laser Overvoltage Protection</li> <li>• Over Temperature Protection</li> <li>• Temperature Window Protection</li> </ul>
Display	LCD TFT 480 x 272 Pixel
CLD1015 Socket for Laser Diode	14 pin "Butterfly" Type 1 (Pump) / Type 2 (Telecomm)
CLD1010LP Socket for Laser Diode	LP Pigtailed Laser Diodes, Pin Codes A, D, E, G
CLD1011LP Socket for Laser Diode	LP Pigtailed Laser Diodes, Pin Codes B, C, H
Connector for DC Power Input	2.0 mm center pin connected to +
Connector for Modulation Input	SMA
Connector for Interlock & Laser On Signal	2.5 mm Mono Phono Jack
Connector for USB-Interface	USB Type Mini-B
Chassis Ground Connector	4 mm Banana Jack
Desktop Power Supply	AC: 100 to 240 V $\pm 10\%$ , 47 to 63 Hz DC: 12 V $\pm 5\%$ / 3.5 A
Maximum Power Consumption	40 VA
Operating Temperature <sup>1)</sup>	0 to +40 °C
Storage Temperature	- 40 to +70°C
Warm-up Time for Rated Accuracy	30 min
CLD1015 Weight (with power supply)	1.0 kg
CLD1010LP Weight (with power supply)	1.1 kg
CLD1011LP Weight (with power supply)	1.1 kg
Dimensions w/o Operating Elements (W x H x D)	111 x 73.5 x 153.3 mm <sup>3</sup> (4.37 x 2.9 x 6.04 in <sup>3</sup> )
Dimensions with Operating Elements (W x H x D)	111 x 73.5 x 169.9 mm <sup>3</sup> (4.37 x 2.9 x 6.69 in <sup>3</sup> )

<sup>1)</sup> non-condensing

All technical data are valid at 23  $\pm$  5°C and 45  $\pm$  15% rel. humidity (non condensing)

## 6.2 Dimensions CLD101x

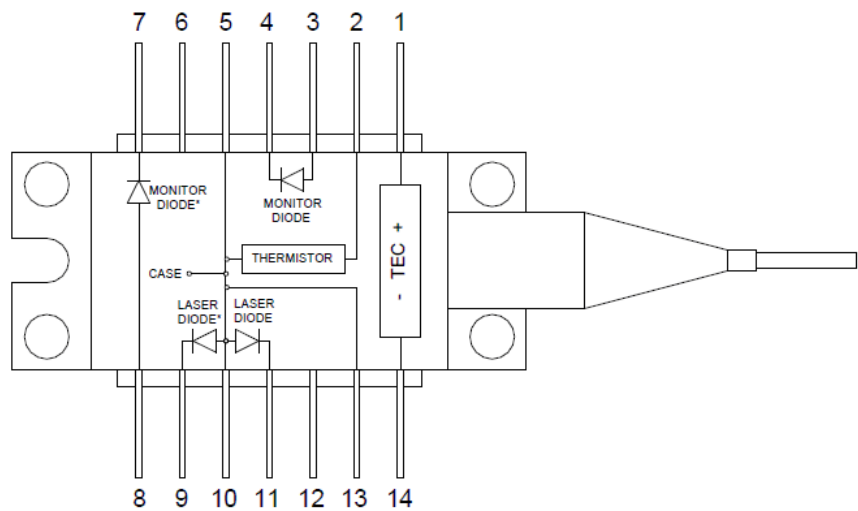


### 6.3 Standard Laser Diode Pinouts

#### BFY (Butterfly Style) Laser Diodes

There are two standard pin-outs for 14 pin "butterfly" (BFY) housing laser diodes:

##### Type 1 - Pump Laser Diodes

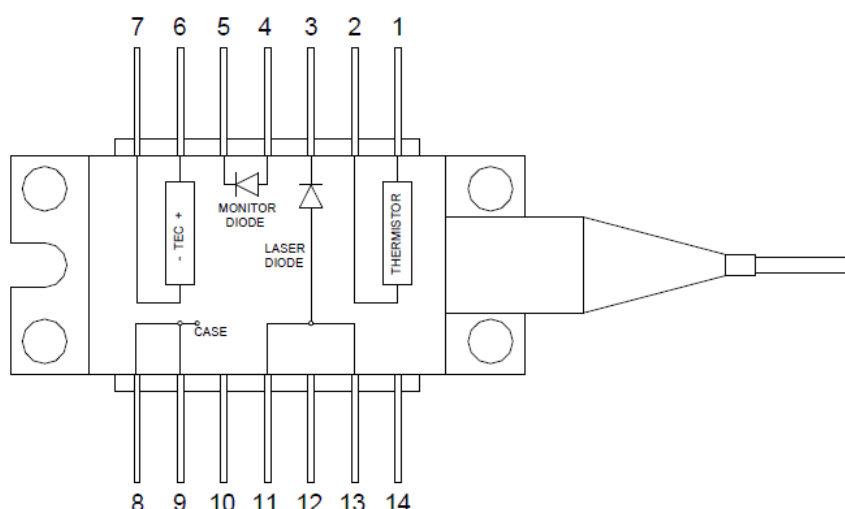


1	TEC +	14	TEC -
2	Thermistor	13	GND
3	Photo Diode Anode <sup>1)</sup>	12	N.C.
4	Photo Diode Cathode <sup>1)</sup>	11	Laser Diode Cathode <sup>2)</sup>
5	Thermistor	10	Laser Diode Anode
6	N.C.	9	Laser Diode Cathode <sup>2)</sup>
7	Photo Diode Cathode <sup>1)</sup>	8	Photo Diode Anode <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Alternative connection for photodiode

<sup>2)</sup> Alternative connection for laser cathode

## Type 2 - DFB Laser Diodes

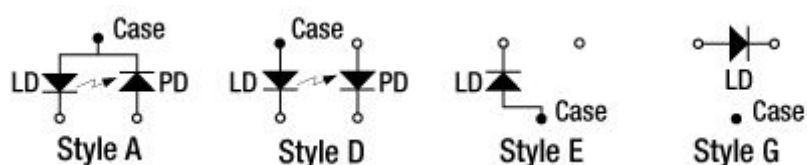


1	Thermistor	14	N.C.
2	Thermistor	13	Laser Diode Anode
3	Laser Diode Cathode	12	N.C.
4	Photo Diode Anode	11	Laser Diode Anode
5	Photo Diode Cathode	10	NC
6	TEC +	9	GND
7	TEC -	8	GND

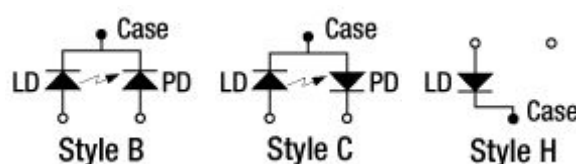
## Supported TO Can Pin Styles

Thorlabs TO can laser diodes are categorized in 8 pin styles, called A to H.

The CLD1010LP supports all pin styles with laser diode anode grounded or floating, these are the pin styles A, D, E and G:



The CLD1011LP supports all pin styles with laser diode cathode grounded, these are the pin styles B, C, and H:



### Note

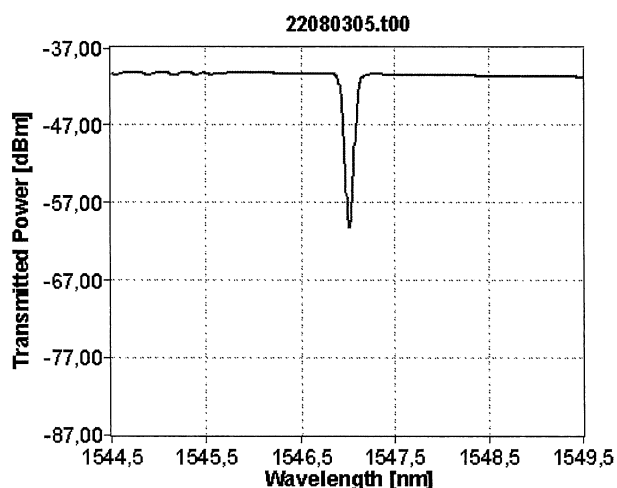
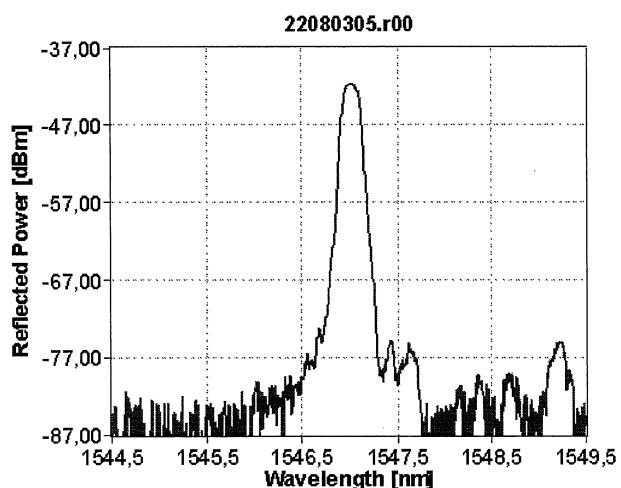
Above presentation is the bottom view to the laser. The pin style for each individual laser diode is stated on the web site and in the individual Product Data Sheet, coming with the laser diode.



## FBG Data Sheet

Company:	Advanced Optics Solutions (AOS) GmbH	Date:	01.11.2010
Address:	Ammonstr. 35 01067 Dresden, Germany	Time:	13:52:11
		SerNo:	22080305
Phone:	+49 (0)351 4960 193		
Fax:	+49 (0)351 4960 194	Customer:	428
E-mail:	info@aos-fiber.com	Order-No:	Uni Navara P2- /4047
Web:	www.aos-fiber.com	Operator:	L.Fuhr

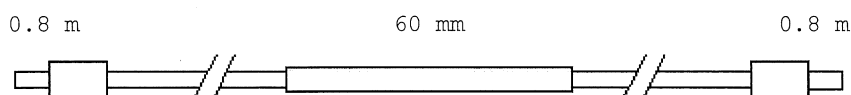
### OSA traces:



### Measured Parameters:

Reflection Bandwidth	[nm]	[GHz]	Center Wavelength [nm]:	1547.027
			Center Freq [THz]:	193.8
			Transmission Loss [dB]:	20.2
-1.0 dB	0.145	18.1	Reflectivity [%]:	99.0
-3.0 dB	0.190	23.8	SNR @+/-1nm [dB]:	33.0
-20 dB	0.375	46.9		

### Configuration:



Fiber type:  
Corning SMF28

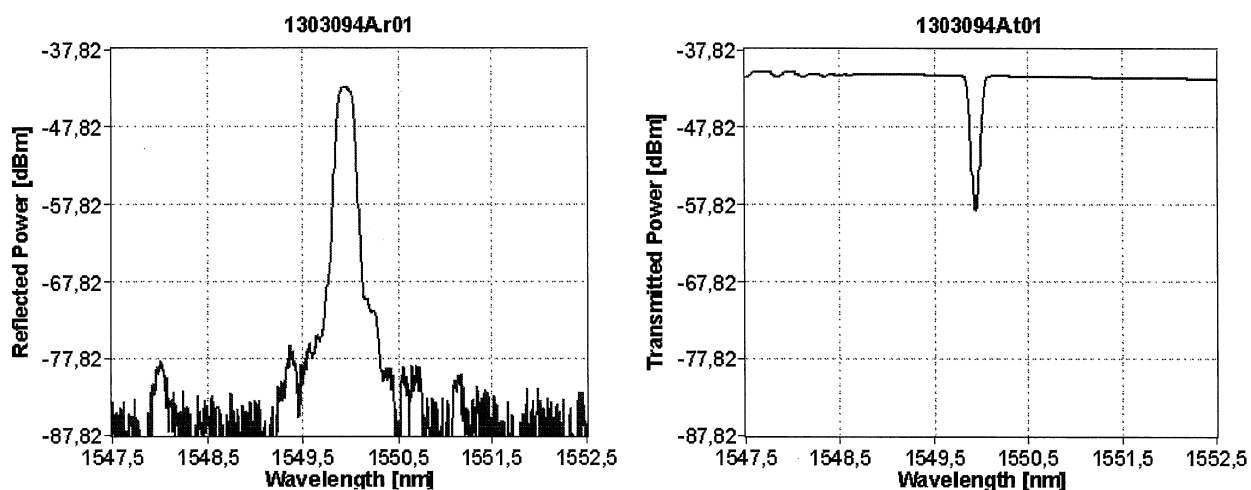
### Notes:



## FBG Data Sheet

<b>Company:</b>	Advanced Optics Solutions (AOS) GmbH	<b>Date:</b>	01.11.2010
<b>Address:</b>	Ammonstr. 35 01067 Dresden, Germany	<b>Time:</b>	13:47:50
		<b>SerNo:</b>	1303094A
<b>Phone:</b>	+49 (0)351 4960 193		
<b>Fax:</b>	+49 (0)351 4960 194	<b>Customer:</b>	428
<b>E-mail:</b>	info@aos-fiber.com	<b>Order-No:</b>	Uni Navara P2- /4047
<b>Web:</b>	www.aos-fiber.com	<b>Operator:</b>	L.Fuhr

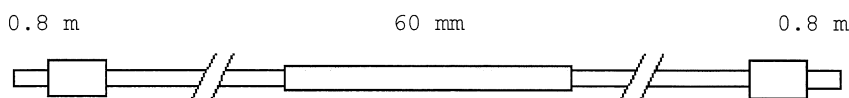
### OSA traces:



### Measured Parameters:

Reflection Bandwidth	[nm]	[GHz]	Center Wavelength [nm]:	1549.955
			Center Freq [THz]:	193.4
			Transmission Loss [dB]:	17.8
-1.0 dB	0.125	15.6	Reflectivity [%]:	98.3
-3.0 dB	0.165	20.6	SNR @+/-1nm [dB]:	35.3
-20 dB	0.300	37.4		

### Configuration:



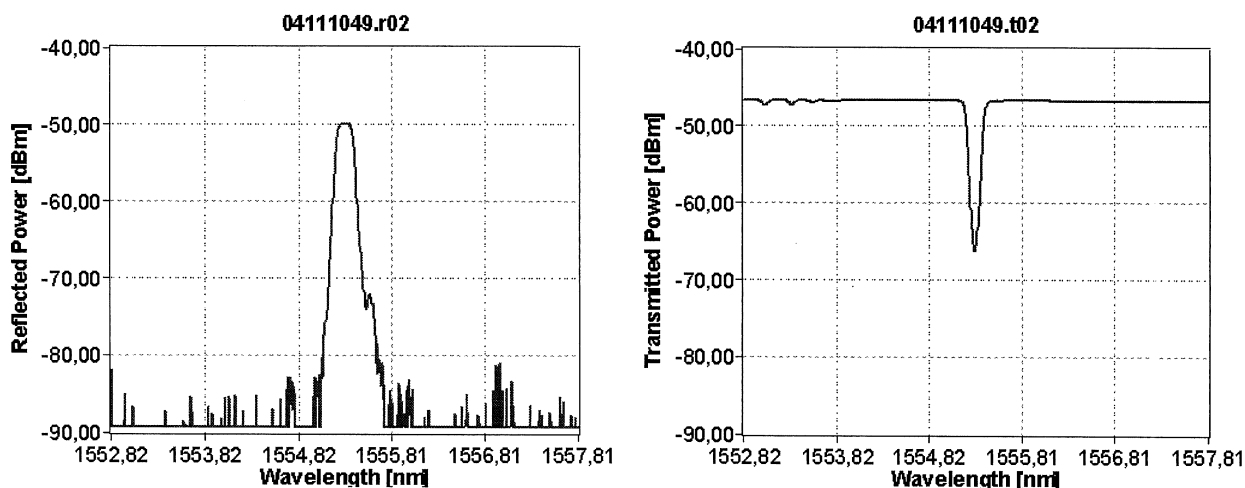
Fiber type:  
Corning SMF28

### Notes:

## FBG Data Sheet

<b>Company:</b>	Advanced Optics Solutions (AOS) GmbH	<b>Date:</b>	04.11.2010
<b>Address:</b>	Ammonstr. 35 01067 Dresden, Germany	<b>Time:</b>	13:56:06
		<b>SerNo:</b>	04111049
<b>Phone:</b>	+49 (0)351 4960 193		
<b>Fax:</b>	+49 (0)351 4960 194	<b>Customer:</b>	428
<b>E-mail:</b>	info@aos-fiber.com	<b>Order-No:</b>	Uni Navara P2- /4047
<b>Web:</b>	www.aos-fiber.com	<b>Operator:</b>	Fuhr

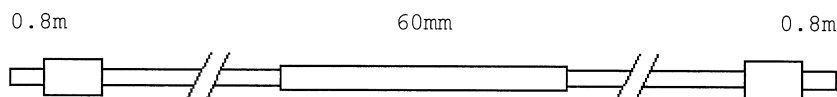
### OSA traces:



### Measured Parameters:

Reflection Bandwidth	[nm]	[GHz]	Center Wavelength [nm]:	1555.310
			Center Freq [THz]:	192.8
			Transmission Loss [dB]:	19.7
-1.0 dB	0.155	19.2	Reflectivity [%]:	98.9
-3.0 dB	0.195	24.1	SNR @+/-1nm [dB]:	30.9
-20 dB	0.370	45.8		

### Configuration:



Fiber type:  
Corning SMF28

### Notes:





## Doped Fiber

VERSION: MD16/1

RELEASE DATE: 8 NOVEMBER 2013

## Datasheet

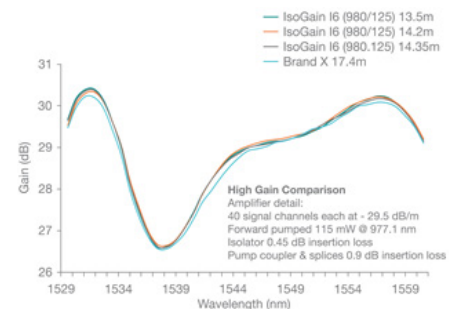
# Erbium Doped Fiber IsoGain™

Fibercore's IsoGain™ range of Erbium Doped Fibers (EDFs) offer a wide selection of absorption and cut-off wavelengths to allow the best choice of fiber for each type of Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) design.

Fibercore's low absorption fibers offer best-in-class efficiency for C-band amplifiers whilst higher absorption fibers are optimized for L-band EDFAs.

High cut-off wavelength (HC) fibers have larger core diameters, reducing non-linear effects and increasing efficiency at higher pump powers.

The core composition of Fibercore's IsoGain™ has been engineered to generate a substantially flattened wavelength response that closely matches that of other leading fiber types.



Supported by Fibercore's **GainMaster™** simulation software

### Advantages:

- High efficiency core composition
- 'HC' variants optimized for high pump power EDFAs
- High absorption fibers for L-band amplifiers and mini/micro C-band EDFAs
- Wide range of absorption values for EDFA design optimization

### Typical applications:

- EDFAs / Telecoms
- ASE Light Sources
  - Gyros
  - Current Sensors
  - Distributed Sensor Systems
- Fiber Lasers
- Biomedical Illumination
- Optical Coherence Tomography (OCT)

### Related Products:

- Erbium Doped Fiber MetroGain™
- Dual-Clad Erbium/Ytterbium Doped Fiber (CP1500Y)
- GainMaster™ Simulation Tool

### Product Variants:

- **I-4 (980/125)**  
For high efficiency C-band EDFAs
- **I-4 (980/125)HC**  
For high efficiency, high power C-band EDFAs
- **I-6 (980/125)**  
Increased absorption for high efficiency C-band EDFAs
- **I-12(980/125)**  
Mid level absorption fiber for short length C-band and L-band EDFAs
- **I-12(980/125)HC**  
High cut off wavelength, mid level absorption fiber for higher power short length C-band and L-band EDFAs
- **I-15(980/125)HC**  
High cut off wavelength, mid/high level absorption fiber for higher power short length C-band and L-band EDFAs
- **I-25 (980/125)**  
Very high absorption fiber for short length L-band EDFAs
- **I-25H(1480/80)**  
80µm cladding diameter, high cut off wavelength, high absorption fiber for small coil diameter mini and micro EDFAs

## Specifications

### High Efficiency C-Band Erbium Doped Fibers

	I-4(980/125)	I-4(980/125)HC	I-6 (980/125)
Cut-Off Wavelength (nm)	870 – 970	1000 – 1320	870 – 970
Numerical Aperture	0.22 – 0.24		
Mode Field Diameter (μm)	5.4 – 6.6 @1550nm	5.2 – 5.8 @1550nm	5.5 – 6.3 @1550nm
Absorption (dB/m)	5.0 – 6.7 @1531nm	7.7 – 9.4 @1531nm	7.2 – 8.4 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100 kpsi)		
Attenuation (dB/km)	≤10 @1200nm		
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤0.005		
Cladding Diameter (μm)	125 ± 1		
Core Concentricity (μm)	≤0.3		
Coating Diameter (μm)	245 ± 15		
Coating Type	Dual Acrylate		

### L-Band and C-Band Erbium Doped Fibers

	I-12(980/125)	I-12(980/125)HC	I-15(980/125)HC	I-25(980/125)
Cut-Off Wavelength (nm)	900 – 970	1200 – 1320	1200 – 1320	900 – 970
Numerical Aperture	0.21 – 0.23	0.23 – 0.26		
Mode Field Diameter (μm)	5.7 – 6.6 @1550nm	5.0 – 5.5 @1550nm	4.8 – 5.4 @1550nm	5.2 – 6.3 @1550nm
Absorption (dB/m)	14 – 21 @1531nm	17 – 21 @1531nm	27 – 33 @1531nm	35 – 45 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100kpsi)			
Attenuation (dB/km)	≤10 @1200nm			
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤0.005			
Cladding Diameter (μm)	125 ± 1			
Core Concentricity (μm)	≤0.3			
Coating Diameter (μm)	245 ± 15			
Coating Type	Dual Acrylate			

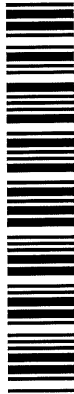
### Reduced Cladding Erbium Doped Fiber For Mini and Micro EDFAs

	I-25H(1480/80)
Cut-Off Wavelength (nm)	900 - 1025
Numerical Aperture	≥0.30
Mode Field Diameter (μm)	3.8 – 4.7 @1550nm
Absorption (dB/m)	23 – 27 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100kpsi)
Attenuation (dB/km)	≤30 @1200nm
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤0.005
Cladding Diameter (μm)	80 ± 1
Core Concentricity (μm)	≤0.5
Coating Diameter (μm)	160 ± 10
Coating Type	Dual Acrylate

Visit [fibercore.com/fiberpaedia](http://fibercore.com/fiberpaedia) for our encyclopedia of industry terms/knowledge base.

Test Data Sheet

Test Data Sheet



Model	LU0975M500-1016F10A
Serial No	700552
Module ID	704680
Date	17-Jun-14

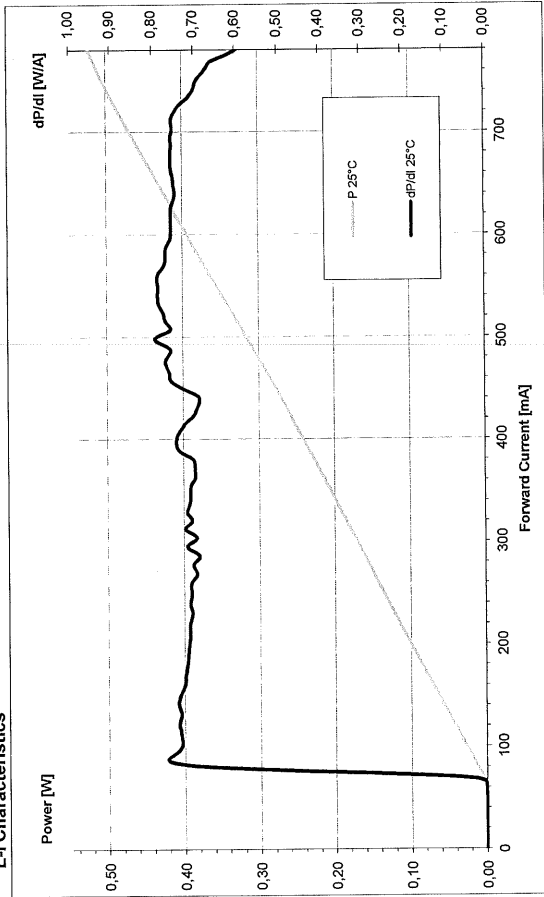
Model	LU0975M500-1016F10A
Serial No	700552
Module ID	704680
Date	17. Jun. 14

Characteristics @ 25°C (T<sub>chip</sub> and T<sub>case</sub>)

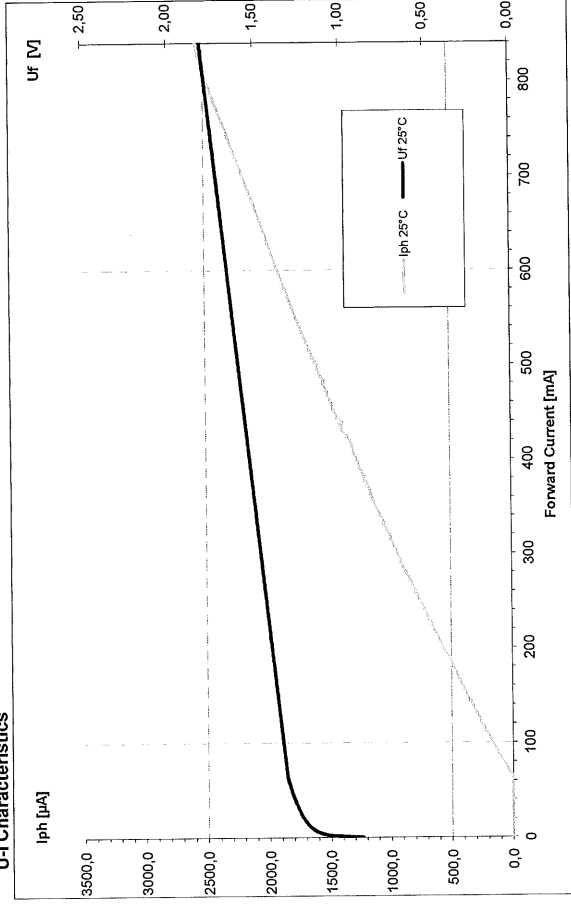
Parameter at c.w.	Sym.	Value	Unit
Operating Power (1)	P <sub>op,nom</sub>	500	mW
Peak Wavelength	λ <sub>max</sub>	975,3	nm
FWHM	λ <sub>FWHM</sub>	0,34	nm
Laser Operating Current	I <sub>op</sub>	742	mA
Threshold Current	I <sub>th</sub>	63,9	mA
Forward Voltage at I <sub>op,nom</sub>	U <sub>op,nom</sub>	1,74	V
Monitor Current at P <sub>op,nom</sub>	I <sub>pd,nom</sub>	2312	µA
Thermistor Resistance	R <sub>th</sub>	10,000	kOhm
Monitor Responsivity	R <sub>mon</sub>	4,6	µA/mW

Important Notes:  
(1) The maximum operating power P<sub>op</sub> will be achieved at a device-specific current, the Laser Operating Current, I<sub>op</sub>. The pump laser shall never be operated at a power higher than the maximum operating Power P<sub>op</sub> throughout its lifetime. At Begin of Life (BOL), the operating current shall never be higher than the device-specific maximum operating current, I<sub>op</sub>. At End of Life (EOL), the operating current shall never be higher than the device-specific laser operating current.  
(2) Peak wavelength shifts with current for non FBG stabilised modules (typ. 5nm/A at c.w. operation / pulsed condition lower depending on pulse width and duty cycle)  
(3) Back reflection of light into the laser module must be strictly avoided. It can cause fatal laser diode facet damage. It is highly recommended to use double surge isolators especially for applications in fiber lasers or amplifiers.

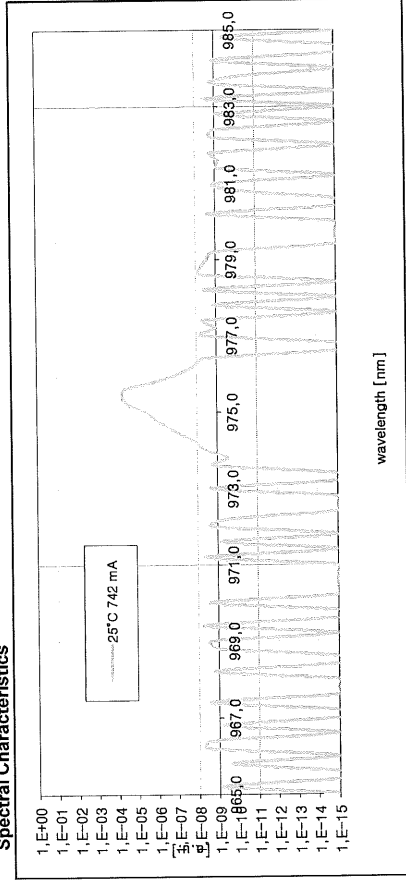
L-I Characteristics



U-I Characteristics

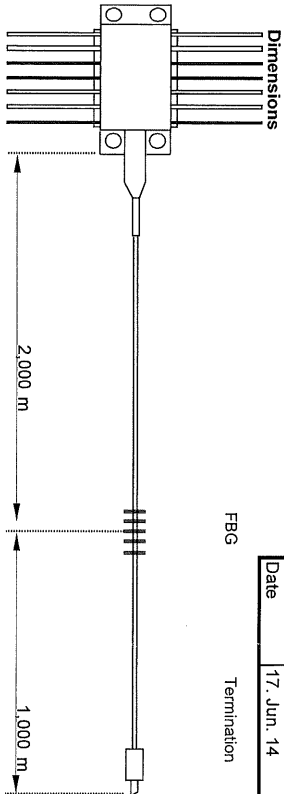


Spectral Characteristics





Model	LU0975M500-1016F-10A
Serial No	700552
Module ID	704680
Date	17. Jun. 14

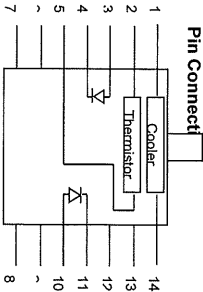


Variation of responsivity at begin of life (BOL)	$0.8^{+100}_{-100} \leq I_{op} \leq 1.2^{+100}_{-100}$
$I_{BOL}$	min 0.95 max 1.03
$P_{op}$	$(I_{FBOL} - s_{BOL}) \leq I_{op} \leq 0.8^{+100}_{-100}$
$P_{FBOL}$	min 0.74 max 0.94

Termination	FC/APC
-------------	--------

TEC Characteristics @ $I_{op}$ with Laser @ 25°C and Case @ 70°C	
Cooler Current	1.14 A
Cooler Voltage	2.01 V

Fiber Characteristics	
Fiber Type	H11060
Fiber Spliced	n



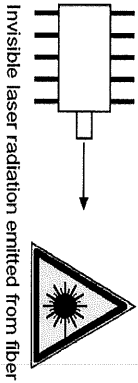
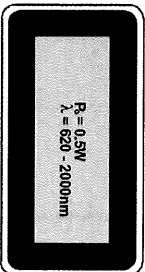
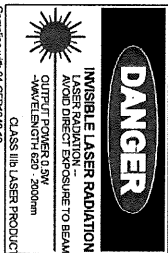
1	Cooler(+)	14	Cooler(-)
2	Thermistor	13	Case ground
3	PD Anode	12	nc
4	PD Cathode	11	Laser Cathode
5	Thermistor	10	Laser Anode
6	nc	9	nc
7	nc	8	nc

## Precautions

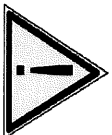
1. The laser light emitted from this device is **invisible** and may be **harmful** to the human eye and skin. Avoid looking directly into the fiber when the device is in operation. Use of protective gear is recommended when the device is in operation.
2. To maximize thermal transfer to the **heatsink**, the heatsink mounting surface must be flat to within 0.025mm and the mounting screws must be torqued down to 0.17Nm
3. The **TEC current** should never exceed the **Maximum TEC Current Rating** specified in the data sheet. Any over current may heat the laser and the internal optical bench such that the optical power drops irreversible by a significantly value.
4. **Power supply**: Transient electric spike (above maximum rated current) may cause a damage to the laser. A surge-free power supply and a slow starter circuit should be used. To avoid causing an electrical surge, pins should not be connected or disconnected on the fixture before turning the power off.
5. Electrostatic discharge is the primary cause of unexpected laser diode failure. Take extreme precaution to prevent ESD. Use wrist straps, grounded work surfaces and rigorous antistatic techniques when handling this device.
6. In order to minimize light reflection, the ferrule flange end of the fiber pigtail may be 8degree angle polished. Keep ferrule flange and surface clean to **prevent contaminated dirt or scratch**.
7. Extremely **careful attention** is required when this pump laser module is in operation. This device should be operated and handled by experienced personnel. Any doubted matters during or before operation should be discussed with Lumics.
8. This product contains GaAs based semiconductor materials. Follow the instructions for **GaAs**

## material safety

9. **Disposal considerations**: Contact a licensed professional waste disposal service to dispose this GaAs containing material. Observe all federal state and local environmental regulations.
10. Do not open the module



Glass fiber subject to breakage if mishandled. Permanent damage to device may result. Handle fiber with extreme care.



## Inspection Sheet

Product Name: Single Mode Two Window Coupler

Connectors: 2FC/APC-2FC/APC

Coupler Type: 2x2, 10/90

Test Date: 17/11/2004

Serial Number: 04A027614

Operating Wavelength (nm): 1310±20/1550±20 nm

Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
1	PA(10%)	10.81	10.42
	PB(90%)	0.65	0.68
2	PA(90%)	0.61	0.71
	PB(10%)	10.82	10.63

Uniformity (dB): < 0.8

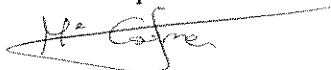
Polarization Stability (dB): < 0.2

Directivity (dB): > 55

Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

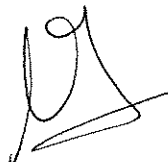
Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

Medido por:



Fecha: 17 NOV. 2004

Aprobado por:



## INSPECTION SHEET

### DEVICE INFORMATION

<b>PRODUCT NAME</b>	WIC 2x2				
<b>CLASS</b>	NA	<b>ATTENUATION</b>	NA	<b>TYPE</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SM <input type="checkbox"/> MM
<b>CONNECTORS</b>	2 FC/APC - 2 FC/APC				
<b>COUPLER TYPE</b>	2x2 - 1310/1550 nm		<b>COUPLING RATE</b>	5:95	
<b>OPERATING WAVELENGTH (nm)</b>	1310±40nm/1550±40nm		<b>SERIAL NUMBER</b>	04A007968	
<b>FILTER</b>	<b>PASS BAND BANDWIDTH (nm)</b>	NA		<b>STOP BAND BANDWIDTH (nm)</b>	NA

### INSPECTION VALUES

<b>TEST DATE</b>	10-mar-05	<b>INSERTION LOSS (dB)</b>	See table
<b>ISOLATION (dB)</b>	NA	<b>DIRECTIVITY (dB)</b>	> 55
<b>RETURN LOSS (dB)</b>	>60	<b>POLARIZATION STABILITY (dB)</b>	< 0.15
<b>THERMAL STABILITY (dB)</b>	< 0.2	<b>OPERATION TEMPERATURE (°C)</b>	- 40 to 85

	<b>INSERTION LOSS (dB)</b>			1310nm	1550nm
	<b>DEVICE No.</b>	<b>BRANCH</b>	<b>COUPLING</b>	<b>I.L (Max)</b>	<b>I.L (Max)</b>
WIC	A	1	5%	14.39	14.53
		2	95%	0.53	0.54
	B	1	95%	0.70	0.71
		2	5%	14.54	14.77

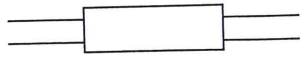
Nota: Por cada conector se consideran 0.3 dB de pérdidas de inserción

APPROVED \_\_\_\_\_

# Optical Coupler Test Report - oeMarket.com

P/N:SWB-1550-2x2-P-30/70-1-FA

S/N: A130045753

Operate Wavelength:	1550±40nm		
Fiber Type:	SMF-28e fiber with 900um loose tube		
Splitting Ratio:	30:70		
Main Spec		IL(dB) @1550nm	PDL (dB) @1550nm
Port1(color red) → Port3(color black)		1.98	0.01
Port1(color red) → Port4(color blue)		5.53	0.02
Port2(color white) → Port3(color black)		5.63	0.01
Port2(color white) → Port4(color blue)		1.76	0.03
Connector Type		FC/APC	
Fiber Length		1m	
Directivity(dB)	>60	Operating Temperature	-20℃ to + 70℃
		Storage Temperature	-40℃ to + 85℃

\*All data measured at central wavelength. RoHS compliant.

Date:2 May 2013

## Cámara climática:

MARCA: BINDER

MODELO: FD-23

### ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura:	300°C	
Variación de temperatura:	a 70°C	0.8°C
	a 150°C	2.2°C
	a 300°C	4.3°C
Fluctuación de la temperatura:	±0.3°C	
Tiempo de calentamiento:	hasta 70°C	7min
	hasta 150°C	22min
	hasta 300°C	45min





## Multiplexor en longitud de onda 980/1550 (WDM):

MARCA: OPNETI

MODELO: FWDM-95-2-1-FA

### ESPECIFICACIONES

Longitud de onda (canal 1550):	1520-1600 nm
Longitud de onda (canal 980):	965-1000 nm
Pérdidas de inserción (canal 1550):	0.45 dB
Pérdidas de inserción (canal 1980):	0.6 dB
PDL:	<0.02 dB
Pérdidas de retorno:	> 60dB



### Aislador:

Parameter	Grade U	Grade P	Grade A
Center wavelength (nm) $\lambda_c$	1310, 1550, 1590		
Peak Isolation (dB, min.)	65	58	55
Isolation (dB, min.) $\pm 30\text{nm}$ 23°C all SOP	50	46	45
Isolation (dB, min.) $\pm 15\text{nm}$ 0~70°C all SOP	42	38	34
Insertion Loss (dB, typ.) $\lambda_c$ 23°C all SOP	0.4	0.5	0.6
Insertion Loss (dB, max.) $\pm 20\text{nm}$ 0~70°C all SOP	0.6	0.7	0.8
PDL (dB, max.) $\lambda_c$ 23°C all SOP	0.05	0.10	0.10
PMD (ps, max.)	0.05	0.05	0.07
Return loss (dB, min.) – Input/Output	65/60	60/55	60/55
Power handling (mW, max.)	300 (1000 optional)		
Fiber Type	Corning SMF-28 or SMF-28e		
Operating temperature (°C)	-5 ~ +70		
Storage temperature (°C)	-40 ~ +85		
Dimensions (mm)	$\phi 5.5 \times L32$		

### Circulador:

Parameters	Unit	Specifications	Test Data
Operating Wavelength	(nm)	1550 $\pm$ 30	1550 $\pm$ 30
IL (Port1 to Port2)1550 nm	(dB)	$\leq 1.1$	0.70
IL (Port2 to Port3)1550 nm	(dB)	$\leq 1.1$	0.93
PLD (Port1 to Port2)	(dB)	$\leq 0.15$	0.02
PLD (Port2 to Port3)	(dB)	$\leq 0.15$	0.02
Minimum Isolation	(dB)	$\geq 40$	58
DIR	(dB)	$\geq 50$	60
Return Loss	(dB)	$\geq 50$	60
Power Handling	(mW)	500	
Connector		FC/APC	
Operating Temperature	(°C)	0-70	
Dimension	mm	$\phi 5.5 \times 50$	

### Splitter 2x4:

CR(%)	25/25/25/25							
Wavelength	1310		1550		1310		1550	
Lead Mark	CR(%)	IL(dB)	CR(%)	IL(dB)	CR(%)	IL(dB)	CR(%)	IL(dB)
Port 1	25.4	5.9	24.8	6.1	25.2	5.9	25.0	6.0
Port 2	24.2	6.2	25.2	5.9	24.7	6.1	25.0	6.0
Port 3	25.1	6.0	24.4	6.1	25.1	6.0	24.0	6.2
Port 4	25.3	5.9	25.6	5.9	25.0	6.0	26.0	5.8
EL(dB)	0.30		0.32		0.42		0.45	

### Fibra óptica:

#### SMF 1 000 m:

Atenuación:

1310 nm      0.331 dB/Km

1550 nm      0.217 dB/Km

#### SMF 1 500 m:

Atenuación:

1310 nm      0.306 dB/Km

1550 nm      0.164 dB/Km

#### SMF 5 000 m:

Atenuación:

1310 nm      0.313 dB/Km

1550 nm      0.181 dB/Km